

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**PREVISÕES SAZONAIS DE VAZÃO PARA O RIO SÃO FRANCISCO COM BASE
EM PREVISÕES NUMÉRICAS DE PRECIPITAÇÃO**

Camila Coelho Welerson

Itajubá (MG)

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

Camila Coelho Welerson

PREVISÕES SAZONAIS DE VAZÃO PARA O RIO SÃO FRANCISCO COM BASE
EM PREVISÕES NUMÉRICAS DE PRECIPITAÇÃO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Itajubá, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de Concentração: Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva

Itajubá (MG)

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

Camila Coelho Welerson

PREVISÕES SAZONAIS DE VAZÃO PARA O RIO SÃO FRANCISCO COM BASE
EM PREVISÕES NUMÉRICAS DE PRECIPITAÇÃO

Dissertação aprovada pela banca examinadora
em 12 de março de 2020, conferindo à autora o
título de Mestre em Ciências em Meio
Ambiente e Recursos Hídricos.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva (Orientador)
Universidade Federal de Itajubá

Profª Drª Michelle Simões Reboita
Universidade Federal de Itajubá

Profª Drª Talita Fernanda das Graças Silva
Universidade Federal de Minas Gerais

Itajubá (MG)

2020

Dedico este trabalho à minha mãe, por sempre compartilhar dos meus sonhos e ter traduzido meus dias em paciência, perseverança, força e saudade.

AGRADECIMENTOS

A caminhada até a conclusão deste mestrado foi sem dúvidas a mais difícil que trilhei. Entre perdas e ganhos, fica a maior das dádivas: o aprendizado. Esse que não se resume apenas ao conhecimento adquirido nas salas de aula, mas nas experiências vivenciadas durante todo o processo. E é por essa oportunidade de evolução profissional e pessoal que primeiramente agradeço a Deus, por ter me guiado e dado forças em todos os momentos e ter colocado as pessoas certas em meu caminho. Agradeço ao grande amor da minha vida e minha maior saudade: mãe, palavra que mais sinto falta de chamar em voz alta todos os dias, que você continue se orgulhando de mim e me iluminando para que eu consiga ser metade da mulher incrível que você foi. Tudo que eu sou e tenho hoje, devo a você. Ao meu pai, meu melhor amigo e companheiro, por ser o grande incentivador dos meus estudos e me colocar sempre em primeiro lugar. Ao melhor presente que a vida me deu, minha irmã Daniela, pela parceria, cumplicidade e amor incondicional.

Aos meus avós, tios e primos, por terem fortalecido os laços e serem luz nos meus dias, agradeço pelo carinho e orações. Ao Moisés e familiares, por terem me acolhido e apoiado durante grande parte dessa trajetória. Lívia e Leandro, por serem tão especiais e terem tanto carinho por mim, obrigada por me acolherem também em sua família. Aos meus irmãos de coração: Adriane, Carlos Eduardo, Giovanna, Laís, Raphaella e Thaisa, por serem meu alicerce e se fazerem sempre presentes. Aos grandes amigos dos tempos de Ouro Preto e a todas da República Patotinha, pelo companheirismo que ultrapassa os limites do tempo e distância.

Ao meu estimado orientador na graduação, Antenor Barbosa, por ter me direcionado para a carreira acadêmica na área de hidrologia e ser meu grande exemplo de competência, dedicação e comprometimento; é uma honra me referir ao senhor não somente como professor, mas também como colega de profissão e amigo.

À Universidade Federal de Itajubá pelo ensino de qualidade e estrutura favorável ao desenvolvimento acadêmico, em especial a todos os profissionais do Instituto de Recursos Naturais: professores, servidores técnicos-administrativos e as meninas da equipe de limpeza. Aos professores que ministraram as disciplinas que cursei e que foram fundamentais no meu aprendizado: Ana Lúcia Fonseca, Daniela Rocha, Fernando das Graças Silva, Nívea Pons e Rogério Melloni. Aos amigos do CERPCH e salas adjuntas, pelo ambiente agradável para os estudos e por tornarem meus dias mais divertidos.

Aos colegas do MEMARH, em especial aos amigos que conquistei durante o mestrado por tornarem tudo mais leve: Adriana, Ana Flávia, Brunna, Emerson, Letícia, Mari, Rafael,

Raquel, Takeo, Vanêssa e Winne. Aos meus grandes parceiros de trabalho, Alessandro e Gabriel, por toda ajuda, apoio e pelos momentos de distração.

À equipe do projeto CAPES/ANA - Edital 16/2017, intitulado “Incorporação de previsões climáticas e hidrológicas na gestão da alocação de água no Rio São Francisco”, em especial a Chou Sin Chan e Lineu Neiva Rodrigues, pela oportunidade e aprendizados. Ao CPTEC/INPE pela disponibilização dos dados climáticos do modelo Eta utilizados nesta dissertação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pela concessão da bolsa de estudos.

Às professoras Michelle Reboita e Talita das Graças Silva, por ampliarem meu olhar sobre este trabalho e contribuírem positivamente para o enriquecimento do mesmo.

Por fim e não menos importante, ao maior responsável por essa minha conquista, meu orientador Prof. Benedito, por ter despertado o melhor de mim e não ter me deixado desistir mesmo nos momentos mais difíceis. Sou eternamente grata a Deus por ter colocado a pessoa certa para me guiar mediante as minhas dificuldades e aptidões. Obrigada por ter acreditado no meu potencial, por todas as oportunidades oferecidas durante o programa, por todos os ensinamentos e discussões enriquecedoras e pela dedicação, atenção, paciência e preocupação de sempre.

RESUMO

O Brasil tem enfrentado uma das maiores crises hídricas nos últimos anos em decorrência de eventos extremos hidrológicos e meteorológicos. A irregularidade de eventos de chuva tem afetado gravemente o balanço hídrico das bacias hidrográficas, a exemplo da bacia do rio São Francisco, uma região com alta vulnerabilidade hídrica e que apresenta tendências a desertificação. Devido a extrema relevância nacional dessa bacia para o país, o presente estudo teve como objetivo principal a análise da previsibilidade de eventos extremos que alteram a disponibilidade hídrica da bacia do São Francisco, a partir da integração de um modelo atmosférico regional e de um modelo hidrológico. Para tanto, foi utilizado um conjunto de cinco membros de previsões sazonais de precipitação para cada mês entre o período de 2001 a 2018, sendo essas previsões geradas por um *downscaling* do modelo atmosférico Eta do CPTEC/INPE. Esses dados serviram como variáveis de entrada no modelo hidrológico MGB-IPH na geração de previsões sazonais de vazão na bacia do rio São Francisco. Quanto aos dados observados de precipitação e vazão, utilizados na comparação com os dados previstos, esses foram obtidos de séries históricas dos postos pluviométricos e fluviométricos da Agência Nacional de Águas (ANA), respectivamente, além de séries de vazões naturalizadas dos aproveitamentos hidrelétricos no caso das usinas de Três Marias, Sobradinho, Itaparica/Luiz Gonzaga e Paulo Afonso/Moxotó. A acurácia das previsões foi analisada tanto visualmente, quanto por meio de estatística com o uso dos indicadores Erro Médio Relativo (EMR), Erro Médio Absoluto (EMA) e Coeficiente de Correlação Linear de Pearson (r). Os resultados dos índices EMR e r mostraram que, de maneira geral, os modelos Eta/MGB apresentaram um bom desempenho com relação à previsibilidade hidrológica sazonal para a bacia, sobretudo para as sub bacias localizadas no Alto e Baixo São Francisco. Com relação às antecedências, não foram observadas diferenças consideráveis entre os horizontes analisados, embora os resultados para um mês tenham sido relativamente melhores, principalmente considerando o índice r . Entretanto, aponta-se a necessidade de correções tanto das precipitações previstas, quanto do viés das previsões hidrológicas em algumas regiões, como no caso de Sobradinho, que apresentou alguns erros sistemáticos.

Palavras-chave: Hidrologia. Previsibilidade. Eta. MGB-IPH.

ABSTRACT

Brazil has faced one of the biggest water crises in recent years as a result of extreme hydrological and meteorological events. An irregularity of rain events has a recorded effect on water balance in the hydrographic basins, for example in the São Francisco River basin, a region with high water vulnerability and with desertification trends. Due to the extreme national relevance of this basin for the country, the present study had as main objective the analysis of the predictability of extreme events that altered the water availability of the São Francisco River basin, from the integration of a regional atmospheric model and a hydrological model. For this purpose, a set of five members of seasonal rainfall forecasts was used for each month between the periods from 2001 to 2018, these being generated by a downscaling of the atmospheric model Eta of CPTEC/INPE. These data were provided as input variables in the hydrological model MGB-IPH in the generation of seasonal streamflow forecasts in the São Francisco River basin. As for the observed data of rainfall and streamflow, used in the comparison with the predicted data, these were obtained from historical series of pluviometric and fluvimetric stations of the National Water Agency (ANA), respectively, in addition to series of natural streamflows of the hydroelectric use in the case of the Três Marias, Sobradinho, Itaparica/Luiz Gonzaga and Paulo Afonso/Moxotó hydroelectric stations. The accuracy of the forecasts was analyzed both visually and statistically using the Relative Mean Error (EMR), Mean Absolute Error (EMA) and Pearson's Linear Correlation Coefficient (r) indicators. The results of the EMR and r indices indicated that, in general, the Eta/MGB models showed a good performance of the seasonal streamflow forecasts for the basin, mostly for the sub-basins located in the Upper and Lower São Francisco. Regarding the precedents, no significant differences were observed between the horizons analyzed, although the results for one month were relatively better considering the r index. However, it points to the need for corrections to the rainfall forecasts and the bias in the streamflow forecasts in some regions, as in the case of Sobradinho, which showed some systematic errors.

Keywords: Hydrology. Predictability. Eta. MGB-IPH.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Domínios dos modelos climáticos global e regional.....	22
Figura 2.2 – Domínio do modelo Eta com destaque para a região do Brasil	24
Figura 2.3 – Esquema da integração off-line dos modelos atmosféricos e hidrológicos.....	28
Figura 3.1 – Localização da bacia hidrográfica do Rio São Francisco.....	32
Figura 3.2 – Bacia hidrográfica do Rio São Francisco dividida em regiões fisiográficas e sub bacias.....	33
Figura 3.3 – Distribuição da precipitação média na bacia do rio São Francisco utilizando dados do INMET de 1961 a 2014	35
Figura 3.4 – Localização dos postos pluviométricos e fluviométricos selecionados para obtenção dos dados hidrológicos, com indicação das regiões fisiográficas da bacia do São Francisco	36
Figura 3.5 – Etapas da metodologia adotada no presente estudo	37
Figura 3.6 – Exemplo de uma bacia hidrográfica dividida em células quadradas ligadas entre si por linhas que representam os canais de drenagem	39
Figura 3.7 – Células quadradas do MGB-IPH subdividas em N blocos de uso, tipo e cobertura do solo	39
Figura 3.8 – Discretização em blocos de uso e ocupação do solo e rede de drenagem obtida para a bacia do rio São Francisco	40
Figura 3.9 – Esquema do balanço hídrico em cada unidade de resposta hidrológica.....	41
Figura 3.10 – Resolução espacial do modelo atmosférico regional Eta para a região da bacia hidrográfica do rio São Francisco com grade de 0,4 graus	46
Figura 4.1 – Valores obtidos para cada função objetivo após calibração do MGB-IPH, sendo (a) NS, (b) NSLog e (c) ΔV	51
Figura 4.2 – Hidrogramas observado e calculado para a sub bacia Floresta após calibração do modelo hidrológico	52
Figura 4.3 – Hidrogramas observado e simulado para a sub bacia da UHE de Três Marias após calibração do modelo hidrológico.....	52
Figura 4.4 – Hidrogramas observado e simulado para a sub bacia da UHE de Sobradinho após calibração do modelo hidrológico.....	52
Figura 4.5 – Valores obtidos para cada função objetivo após verificação do MGB-IPH, sendo (a) NS, (b) NSLog e (c) ΔV	54

Figura 4.6 – Hidrogramas observado e simulado para a sub bacia da UHE de Três Marias após verificação do modelo hidrológico	55
Figura 4.7 – Hidrogramas observado e simulado para a sub bacia da UHE de Três Marias após verificação do modelo hidrológico	55
Figura 4.8 – Resultados do índice EMR para toda a bacia do São Francisco considerando os horizontes de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses de antecedência	57
Figura 4.9 – Resultados do índice EMA para toda a bacia do São Francisco considerando os horizontes de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses de antecedência	58
Figura 4.10 – Resultados do coeficiente de correlação linear para toda a bacia do São Francisco considerando os horizontes de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses de antecedência..	59
Figura 4.11 – Vazões observadas e previstas para a sub bacia Porto Alegre, no período de 01/01/2001 a 31/12/2018, com antecedência de um mês.....	60
Figura 4.12 – Vazões observadas e previstas para a sub bacia Santo Inácio, no período de 01/01/2001 a 31/12/2018, com antecedência de um mês.....	60
Figura 4.13 – Vazões observadas e previstas para a sub bacia Boca da Caatinga, no período de 01/01/2001 a 31/12/2018, com antecedência de um mês.....	60
Figura 4.14 – Vazões observadas e previstas, no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 e com antecedência de um mês, para as sub bacias (a) Porto Novo, (b) Fazenda Macambira e (c) Boqueirão	61
Figura 4.15 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Três Marias no período de 01/01/2001 a 31/07/2012 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses..	63
Figura 4.16 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Três Marias no período de 01/08/2012 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses..	64
Figura 4.17 - Valores de EMR obtidos para Três Marias para as quatro antecedências consideradas, com enfoque na análise separada dos períodos antes e depois de agosto de 2012	65
Figura 4.18 – Erros médios obtidos para cada mês entre os anos de 2001 a 2018, quando comparadas as vazões previstas e observadas para Três Marias, para cada uma das antecedências consideradas	66
Figura 4.19 – Valores médios do coeficiente de correlação r obtidos para Três Marias para período de janeiro de 2001 a dezembro de 2018, para as quatro antecedências consideradas	66
Figura 4.20 – Médias mensais das previsões de vazão para Três Marias no período de novembro de 2013 a março de 2014, começando em julho de 2013 e terminando em fevereiro de 2014	68

Figura 4.21 - Médias mensais das previsões de vazão para Três Marias no período de novembro de 2014 a março de 2015, começando em julho de 2014 e terminando em fevereiro de 2015	69
Figura 4.22 – Correlação entre as vazões observadas e previstas para Três Marias para antecedências de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses.....	70
Figura 4.23 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Sobradinho no período de 01/01/2001 a 31/07/2012 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses..	72
Figura 4.24 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Sobradinho no período de 01/08/2012 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses..	73
Figura 4.25 - Valores de EMR obtidos para Sobradinho para as quatro antecedências consideradas, com enfoque na análise separada dos períodos antes e depois de agosto de 2012	74
Figura 4.26 - Erros médios obtidos para cada mês entre os anos de 2001 a 2018, quando comparadas as vazões previstas e observadas para Sobradinho, para cada uma das antecedências consideradas	74
Figura 4.27 - Valores médios do coeficiente de correlação r obtidos para Sobradinho para período de janeiro de 2001 a dezembro de 2018, para as quatro antecedências consideradas	74
Figura 4.28 – Médias mensais das previsões de vazão para Sobradinho no período de novembro de 2013 a março de 2014, começando em julho de 2013 e terminando em fevereiro de 2014	75
Figura 4.29 - Médias mensais das previsões de vazão para Sobradinho no período de novembro de 2014 a março de 2015, começando em julho de 2014 e terminando em fevereiro de 2015	76
Figura 4.30 – Correlação as entre as vazões observadas e previstas para Sobradinho para antecedências de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Conceituação das metodologias dos modelos hidrológicos	19
Tabela 3.1 – Características das regiões fisiográficas da bacia do rio São Francisco	34
Tabela 3.2 – Parâmetros fixos do modelo MGB-IPH.....	42
Tabela 3.3 – Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH.....	43
Tabela 3.4 – Medidas de desempenho consideradas na calibração do MGB-IPH.....	45
Tabela 3.5 - Índices considerados nas análises de desempenho dos modelos Eta/MGB	48
Tabela 4.1 – Valores das funções objetivo obtidos na calibração do MGB-IPH para a bacia do São Francisco no período de 01/01/1990 a 31/12/2000.....	50
Tabela 4.2 – Valores das funções objetivo obtidos na verificação do MGB-IPH para a bacia do São Francisco no período de 01/01/1980 a 31/12/1989.....	53

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa.....	15
1.2	Objetivos	15
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	Previsão hidrológica	17
2.1.1	Previsão de vazões.....	17
2.1.2	Modelos hidrológicos	18
2.2	Previsão climática	20
2.2.1	Modelos de previsão da precipitação.....	21
2.2.2	Previsibilidade climática sazonal	24
2.3	Previsão hidroclimática	27
2.3.1	Integração de modelos hidrológicos e atmosféricos.....	27
2.3.2	Previsão hidroclimática de longo prazo (sazonal).....	29
3.	METODOLOGIA.....	32
3.1	Simulação hidrológica para ajuste do MGB-IPH.....	38
3.1.1	Estrutura do modelo hidrológico	38
3.1.2	Calibração e verificação do MGB-IPH.....	42
3.2	Previsões sazonais de vazão para o Rio São Francisco.....	45
3.2.1	Geração do histórico de previsões hidrológicas	45
3.2.2	Análise das previsões sazonais de vazão	47
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	Ajuste do modelo hidrológico.....	49
4.2	Previsão hidrológica na bacia do São Francisco.....	56
4.2.1	Análise da previsibilidade sazonal de vazões	56
4.2.2	Resultados em Três Marias	62
4.2.3	Resultados para Sobradinho	71
4.2.4	Discussão geral acerca da previsibilidade sazonal pelos modelos Eta/MGB	78
5.	CONCLUSÕES	81
	REFERÊNCIAS.....	83
	APÊNDICE A	95
	APÊNDICE B.....	105

1. INTRODUÇÃO

Ainda que não se tenha um panorama definitivo sobre o impacto direto das mudanças climáticas na distribuição dos recursos hídricos no Brasil, algumas alterações na disponibilidade da água já vêm sendo registradas como consequência de eventos extremos como chuvas intensas, fortes ondas de calor e frio e grandes secas (MARENGO; TOMASELLA; NOBRE, 2017). A irregularidade de eventos de chuva afeta gravemente o balanço hídrico das bacias hidrográficas, que dependem de precipitações constantes para recuperar seus reservatórios. Como consequência, o país tem enfrentado nos últimos anos uma das maiores crises hídricas. Esse cenário atinge diretamente a produção de energia elétrica no Brasil, uma vez que a matriz energética do país ainda é predominantemente hidrelétrica (EPE, 2019). Outras esferas como a economia, a agricultura e o saneamento urbano também são comprometidas seriamente com a escassez hídrica.

Um dos casos mais críticos e recentes ocorreu nos anos de 2014 e 2015 na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), onde os reservatórios dos sistemas de abastecimento de água da região, bem como os das usinas hidrelétricas, atingiram níveis extremamente inferiores à sua capacidade, considerados os menores da história (NOBRE et al., 2016). Em seus estudos, Coelho, Cardoso e Firpo (2016) concluíram que a seca hídrica que acometeu essa região foi resultado de uma série de fatores como baixos totais pluviométricos entre os verões de 2013-2014 e 2014-2015, temperaturas elevadas e mudanças climáticas globais. Segundo Marengo et al. (2015), esse problema foi agravado pela má gestão dos recursos hídricos, pelo aumento da demanda de água e pela ausência de consciência ecológica por parte da população.

Outra região que sofreu com a crise hídrica nos anos de 2014 e 2015 foi a bacia hidrográfica do rio São Francisco. O rio São Francisco é um curso d'água de extrema relevância para o país, atendendo diversos setores como a agricultura, pesca, turismo, consumo humano e geração de energia (com o reservatório de Sobradinho, o maior do Nordeste e um dos maiores do país). Grande parte da bacia se encontra na região Nordeste do Brasil, onde a variabilidade climática é intensa. Além disso, as projeções climáticas futuras para a região da bacia do rio São Francisco indicam aumento de temperatura e redução considerável das precipitações, sugerindo a ocorrência de períodos de seca mais frequentes e uma tendência à desertificação da região (SILVEIRA et al., 2016; MARENGO; TORRES; ALVES, 2017; JONG et al., 2018).

Devido à alta vulnerabilidade hídrica da bacia do rio São Francisco e à sua importância nacional, muitos estudiosos voltaram os olhares para a região, a fim de elucidar questões da

dinâmica dos recursos hídricos e a influência das condições climáticas nos extremos hidrológicos. Como exemplo tem-se o trabalho de Silveira et al. (2016), que apoiaram sua pesquisa na premissa de que a identificação de padrões de variabilidade climática nessa região é de suma importância para as políticas de gestão e manutenção dos recursos hídricos. Dessa forma, analisaram as variáveis meteorológicas temperatura e precipitação, concluindo que, embora os modelos testados apresentassem incertezas para o futuro das precipitações, para a temperatura a tendência foi positiva.

Além de variáveis climáticas como temperatura e precipitação, Taye, Willems e Block (2015) apontam também para a influência notável das mudanças no manejo do solo e do crescimento populacional nos extremos hidrológicos, recomendando a utilização de uma abordagem que envolva modelos climáticos e hidrológicos combinados e que levem em consideração o histórico de alterações no uso do solo. Kauffeldt et al. (2016), porém, alertam para os cuidados na escolha dos modelos que serão utilizados a fim de minimizar as incertezas, listando uma série de aspectos que devem ser considerados, como por exemplo: a disponibilidade do código (que deve ser preferencialmente *open source*), a possibilidade de extração dos dados de entrada de bancos de dados existentes e a flexibilidade de calibração por meio de ferramentas adequadas, além da aplicabilidade do modelo na região estudada.

Para a região da bacia do rio São Francisco, Silva (2005) avaliou a aplicabilidade do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH juntamente com o modelo atmosférico Eta para a previsão de vazões de curto prazo, concluindo que a utilização desses dois modelos integrados a um outro do tipo estocástico para correção dos erros sistemáticos apresentou benefícios significativos em comparação aos métodos empíricos tradicionais. Porém, o autor inferiu acerca de outros desenvolvimentos que visem a complementar os estudos na região e contribuir para atividades relacionadas à gestão de água na bacia e estimativa de alocação do uso da água, como por exemplo a atualização dos dados fisiográficos de entrada e a incorporação de novos desenvolvimentos nos modelos atmosféricos e hidrológicos.

Dessa forma, o presente estudo tem enfoque na calibração do modelo hidrológico utilizado por Silva (2005), bem como na avaliação da capacidade dos modelos MGB-IPH e Eta de preverem satisfatoriamente as vazões na bacia do rio São Francisco a longo prazo. A escolha de se realizar previsões sazonais de vazão se deve pelo seu potencial de contribuição na gestão dos recursos hídricos, uma vez que fornece informações da disponibilidade hídrica com uma maior antecedência no tempo, muitas vezes essenciais nas tomadas de decisão em diversos setores (ALEXANDER; WU; BLOCK, 2019).

1.1 Justificativa

Em vigor desde janeiro de 1997, a Lei nº 9.433/97, também conhecida como Lei das Águas, instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), que tem como um de seus objetivos assegurar a disponibilidade de água em padrões de qualidade adequados às gerações atual e futura (BRASIL, 1997). Além disso, o Art. 2º da referida lei estabelece que a PNRH também objetiva a utilização racional e integrada dos recursos hídricos e a prevenção e defesa contra eventos hidrológicos extremos, sejam eles oriundos de causa natural ou intensificados devido ao uso inadequado dos recursos hídricos (BRASIL, 1997).

Sendo a bacia do Rio São Francisco conhecida por sua importância nacional e baixa previsibilidade hidrológica, estando sujeita a sofrer pelos impactos das alterações no regime de vazões, um dos projetos aprovados no programa CAPES/ANA – Edital 16/2017 visa especificamente a “incorporação de previsões climáticas e hidrológicas na gestão da alocação de água no Rio São Francisco” (CAPES, 2018). Esses estudos têm como propósito não somente a elucidação de questões relacionadas às crises hídricas que acometeram as regiões Nordeste e Sudeste do país nos últimos anos, afetando diversos setores como geração de energia, agricultura e irrigação, mas também a mitigação de possíveis consequências de eventos extremos climáticos e hidrológicos futuros na bacia do Rio São Francisco, dada a projeção climática para a região abordada anteriormente por Silveira et al. (2016), Marengo, Torres e Alves (2017) e Jong et al. (2018). Logo, a maior motivação do presente trabalho é a sua contribuição para o desenvolvimento de uma gestão que inclua a previsão da variabilidade climática e seus efeitos sobre a disponibilidade hídrica do São Francisco com uma maior antecedência no tempo, auxiliando, portanto, na redução dos conflitos de uso das águas na bacia.

1.2 Objetivos

Com base nas questões anteriormente tratadas, o objetivo geral deste estudo é analisar a previsibilidade de vazões na bacia do rio São Francisco para o horizonte sazonal, a partir da integração dos modelos Eta e MGB-IPH. Para alcançar esse objetivo principal e de forma a orientar a metodologia, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- a) Ajustar o modelo hidrológico MGB-IPH para a bacia hidrográfica do Rio São Francisco, mediante atualizações de séries históricas de precipitação e vazão;

- b) Gerar históricos de previsões de vazão no horizonte sazonal para a bacia do rio São Francisco por meio da integração entre os modelos Eta e MGB-IPH;
- c) Analisar o desempenho dos modelos e os possíveis vies das previsões em relação à observação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Previsão hidrológica

Em hidrologia, as questões que envolvem a disponibilidade hídrica e o ciclo hidrológico são abordadas nas equações de balanço hídrico, que consideram a bacia hidrográfica como unidade hidrológica. Identificar e compreender todas as variáveis envolvidas no balanço hídrico é de suma importância para a gestão dos recursos hídricos, pois permite conhecer a dinâmica hídrica de uma determinada região. Como complemento a essa gestão, tem-se ainda a determinação dessa disponibilidade hídrica com certa antecedência no tempo, por meio de métodos de previsão de vazões. Essa previsão pode ser obtida por modelos hidrológicos empíricos, conceituais, ou pela combinação dos dois.

2.1.1 Previsão de vazões

A previsão de vazões consiste na estimativa do escoamento de água de uma bacia hidrográfica, em um determinado ponto do curso d'água, com certa antecedência no tempo (FAN et al., 2016a). Esta antecedência é determinada dependendo da finalidade de aplicação, podendo ser de curto, médio ou longo prazo. A primeira geralmente se trata de previsões com horizonte de até 72 horas, a segunda com horizonte de até 240 horas e a terceira envolve horizontes com antecedência de meses ou anos, também conhecida como previsão sazonal (CUO; PAGANO; WANG, 2011; FAN; MELLER; COLLISCHONN, 2015).

Segundo Silva, Tucci e Collischonn (2006), as previsões de curto e médio prazos podem ser contínuas, quando independem das condições hidrológicas, ou eventuais, quando realizadas em épocas específicas de um evento hidrológico. A utilização desse tipo de previsão é mais vantajosa em períodos de estiagem e em bacias com solos permeáveis, uma vez que a variação lenta da vazão gera menos incertezas, e a antecedência com base na precipitação conhecida depende do tempo de concentração da bacia (SILVA; TUCCI; COLLISCHONN, 2006). As previsões hidrológicas de curto e médio prazos são usualmente utilizadas no sistema de alerta de ocorrência de desastres, como inundações urbanas, ou em conjunto na operação de sistemas hidráulicos (MATOS; PEDROLLO; CASTRO, 2014; SCHWANENBERG et al., 2015).

As previsões de vazão de longo prazo têm grande importância para estudos de gestão eficiente de recursos hídricos, como alocação de água em locais com usos conflitantes, podendo

ser realizada por meio de modelagem climática dinâmica ou estatística (SOUZA FILHO; LALL, 2004). Devido à complexidade de se prever, a um nível quantitativamente satisfatório, todo o comportamento de um sistema sujeito a alterações físicas, condições iniciais variáveis e utilizando uma fonte de dados muitas vezes inconsistente ou incompleta, como é o caso das componentes meteorológicas (FAN; RAMOS; COLLISCHONN, 2015), as previsões de longo prazo podem apresentar certas incertezas (COLLISCHONN; TUCCI; CLARKE, 2005). Porém, devido às evoluções no entendimento entre as relações atmosféricas e hidrológicas por meio do uso de relações empíricas entre variáveis como temperatura, precipitação e escoamento, diversos estudos utilizando esse tipo de previsão têm sido desenvolvidos (ANGHILERI et al., 2016; LIANG et al., 2017; DARIANE; FARHANI; AZIMI, 2018), principalmente por meio da integração de modelos determinísticos hidrológicos e climáticos de alta resolução (SILVA; TUCCI; COLLISCHONN, 2006).

2.1.2 Modelos hidrológicos

Os modelos hidrológicos podem ser definidos como a representação do comportamento de um sistema físico, no caso a bacia hidrográfica, em um dado período de tempo, por meio de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros (COLLISCHONN et al., 2014). Esses modelos podem ser utilizados para representar a vazão observada, descrevendo a magnitude, frequência e duração da vazão no ponto de interesse e para prever alterações nas vazões por meio de estatística, decorrentes de mudanças no clima, uso do solo, regulação do fluxo e retiradas de água (CALDWELL et al., 2015). Segundo Nearing e Gupta (2015), as previsões de vazão por meio de modelos hidrológicos são realizadas com base em hipóteses, que devem seguir uma hierarquia, como: (i) quais processos são restrições essenciais no comportamento do sistema; (ii) como se representam esses processos matematicamente no espaço e no tempo; (iii) quais suposições devem ser feitas na solução das equações diferenciais. Com relação às metodologias dos modelos hidrológicos, estas podem ser diferenciadas por diversos aspectos (MARINHO FILHO et al., 2012), conforme mostrado na Tabela 2.1.

A escolha da metodologia mais adequada depende principalmente do objetivo e da aplicabilidade do modelo à área de estudo. Além disso, Clark et al. (2017) atentam para alguns fatores que podem dificultar na utilização dos modelos, como indisponibilidade de dados, incertezas de algumas variáveis e restrições computacionais. Dessa forma, é recomendado que se utilize de artifícios para melhorar a precisão dos resultados, como por exemplo a realização

de ajustes dos dados estimados para que estes correspondam melhor ao comportamento observado, sendo essa técnica conhecida como calibração.

Tabela 2.1 – Conceituação das metodologias dos modelos hidrológicos

ESTOCÁSTICOS	DETERMINÍSTICOS
Pelo menos uma das variáveis tem comportamento aleatório.	Cada valor de entrada produz um único valor de saída, mesmo que uma variável de entrada seja aleatória.
CONCEITUAIS	EMPÍRICOS
Objetiva representar o sistema físico natural.	Não têm relação com os processos físicos envolvidos e as funções são baseadas em análises estatísticas.
CONCENTRADOS	DISTRIBUÍDOS
Atribuem valores médios representativos de toda a área da bacia.	Consideram a variabilidade espacial das variáveis hidrológicas.
ESTACIONÁRIOS	DINÂMICOS
Descrevem o fenômeno hidrológico em um determinado momento.	As variáveis são em função do tempo.
DISCRETOS	CONTÍNUOS
Modelagem de períodos isolados da série hidrológica (ex.: cheia ou recessão).	Representam longos períodos da série hidrológica

Fonte: Marinho Filho et al. (2012)

A calibração do modelo hidrológico pode ser realizada de forma manual ou automática. A primeira depende essencialmente da experiência do usuário e de seu conhecimento sobre o comportamento da bacia hidrográfica, sendo, portanto, mais demorada e subjetiva (MULETA; NICKLOW, 2005). Já na calibração automática, o usuário deve fornecer inicialmente uma estimativa dos parâmetros que posteriormente serão ajustados com o uso de algoritmos de otimização e isso, segundo Kim et al. (2007), gera resultados mais confiáveis e representativos da realidade. Com relação a essa última calibração, algumas medidas de desempenho podem ser consideradas, como os coeficientes de eficiência Nash-Sutcliffe (ENS) e Nash-Sutcliffe logaritmico (ENSLog) e o erro relativo (ΔV) (COLLISCHONN et al., 2014).

Segundo Collischonn et al. (2014), o coeficiente ENS é influenciado pelas vazões máximas (ou de cheia) e é determinado pela comparação das vazões observadas com as calculadas. O coeficiente ENSLog é influenciado pelas vazões mínimas (ou de estiagem), sendo determinado pela comparação dos logaritmos das vazões observadas e das calculadas. Já o ΔV

é o erro relativo do volume total dos hidrogramas, muito útil nos cálculos da evapotranspiração. Por permitirem uma análise completa das vazões observadas e calculadas, considerando os picos, recessões e uma visão geral dos hidrogramas, a utilização dessas três medidas de desempenho na calibração do modelo hidrológico é tida como suficiente para medir a eficiência do mesmo.

Dentre os modelos hidrológicos aplicáveis às bacias brasileiras, destaca-se o modelo semi conceitual distribuído do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), denominado Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH). Esse modelo, por ter sido desenvolvido a partir das características das grandes bacias nacionais, permitiu a representação satisfatória do ciclo hidrológico da bacia do rio São Francisco, por exemplo, tal como demonstrado nos trabalhos de Silva et al. (2007), Fan et al. (2014), Schwanenberg et al. (2015), Fan et al. (2016b) e Siqueira et al. (2016a). A calibração do modelo para a bacia foi eficiente em todos os estudos citados, que demonstraram que as vazões calculadas para o rio São Francisco foram bem simuladas, embora tenha apresentado alguns problemas na representação nas regiões mais planas de mesma cota (ou zonas de inundação), como nas áreas de reservatórios ou onde os rios da bacia são mais largos. A fim de resolver essa questão, Pontes et al. (2017) apresentaram algumas atualizações no MGB-IPH, sendo uma delas na substituição da metodologia de cálculo do direcionamento de fluxo, o que permitiu não somente a melhor estimativa da vazão nessas áreas, mas também ampliou as possibilidades de simulação em grande escala.

2.2 Previsão climática

Sendo a precipitação a principal fonte de entrada de água no sistema da maioria das bacias hidrográficas brasileiras, quando se deseja realizar de previsões de vazão com antecedência superior ao tempo de concentração da bacia, essa depende essencialmente da previsão da precipitação. Além disso, outras variáveis meteorológicas também devem ser consideradas, como dados de temperatura, umidade, radiação, vento e pressão (GOLDING, 2000). As previsões das condições da atmosfera podem ser simuladas por meio de modelos atmosféricos, que podem ser globais, quando contemplam toda a extensão do planeta, ou regionais, abrangendo uma região específica de estudo (YONUE et al., 2017).

Em climatologia, as condições da atmosfera podem ser classificadas com relação a escala temporal, sendo o tempo definido como o estado da atmosfera em um momento

específico e o clima como uma média do estado da atmosfera durante um período de tempo maior, que pode ser de semanas, meses ou anos (RASMUSSEN et al, 1993). De maneira análoga, a previsão atmosférica pode ser caracterizada basicamente, em termos de antecedência temporal, em dois tipos: previsão de tempo e previsão de clima.

Segundo Silva, Tucci e Collischonn (2006), a previsão de tempo pode ser definida como a estimativa do estado da atmosfera em alguns dias no futuro a partir de dados da superfície terrestre e de diferentes camadas da atmosfera, que podem ser obtidos por meio de medições em estações meteorológicas ou com o uso de radares e balões meteorológicos. Já a previsão de clima é a estimativa da evolução da atmosfera para períodos de tempo superiores, não sendo possível nesse tipo de previsão a representação do momento exato em que um determinado fenômeno ocorre, mas sim de uma média dos valores das variáveis atmosféricas envolvidas (YONUE et al., 2017). É importante ressaltar que o clima é influenciado por condições de contorno com variações lentas no tempo, resultantes da interação constante entre a atmosfera e a superfície. A mais expressiva das condições de contorno é a Temperatura da Superfície do Mar (TSM), sendo a principal responsável pelas variações climáticas de um ano para outro por abranger escalas espaciais de milhares de quilômetros e ter capacidade de duração de um a vários meses (SILVA; TUCCI; COLLISCHONN, 2006).

2.2.1 Modelos de previsão da precipitação

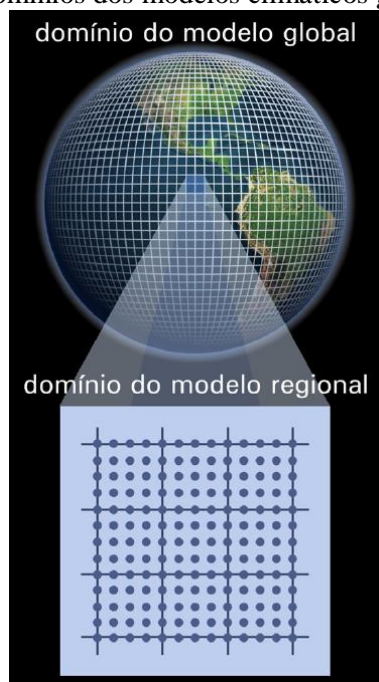
As simulações realizadas por meio dos modelos climáticos são, em resumo, a representação matemática dos processos físicos, biológicos e químicos da atmosfera e suas interações com os demais componentes do sistema climático (EVANS; MCGREGOR; MCGUFFIE, 2012). Esses modelos, comumente utilizados para previsão de tempo e clima, podem ser globais ou regionais.

Segundo Chou et al. (2014), os modelos climáticos globais (ou de circulação geral) são a principal ferramenta para representar a variabilidade climática e consideram o oceano, a atmosfera e a superfície terrestre como um sistema interligado. Esses modelos simulam as características gerais da circulação atmosférica de todo o planeta, e são dirigidos por condições iniciais de todo o globo com resolução horizontal em torno de 200 quilômetros e 28 níveis verticais (YONUE et al., 2017). Custodio et al. (2016) afirmam que, na América do Sul, esses modelos de circulação geral têm apresentado resultados satisfatórios para as previsões sazonais, uma vez que há uma estreita relação entre as anomalias da Temperatura da Superfície do Mar

e a precipitação. Entretanto, uma vez que a resolução espacial desses modelos é baixa devido à extensão da grade de informações, a fim de se estudar uma região específica com maior detalhamento, deve-se recorrer ao uso de modelos climáticos regionais (MARENGO et al., 2014).

Os modelos regionais possuem resolução horizontal maior que os modelos globais, que podem ser de poucos quilômetros, dependendo do grau de detalhamento necessário e do tamanho da área de estudo (YONUE et al., 2017). Eles são dirigidos tanto por condições iniciais quanto por condições de fronteiras laterais, que são fornecidas por modelos globais, uma vez que as condições atmosféricas em um outro ponto podem influenciar os sistemas locais (CHOU et al., 2014). Um esquema dos domínios dos modelos global e regional é representado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Domínios dos modelos climáticos global e regional



Fonte: Yonue et al. (2017)

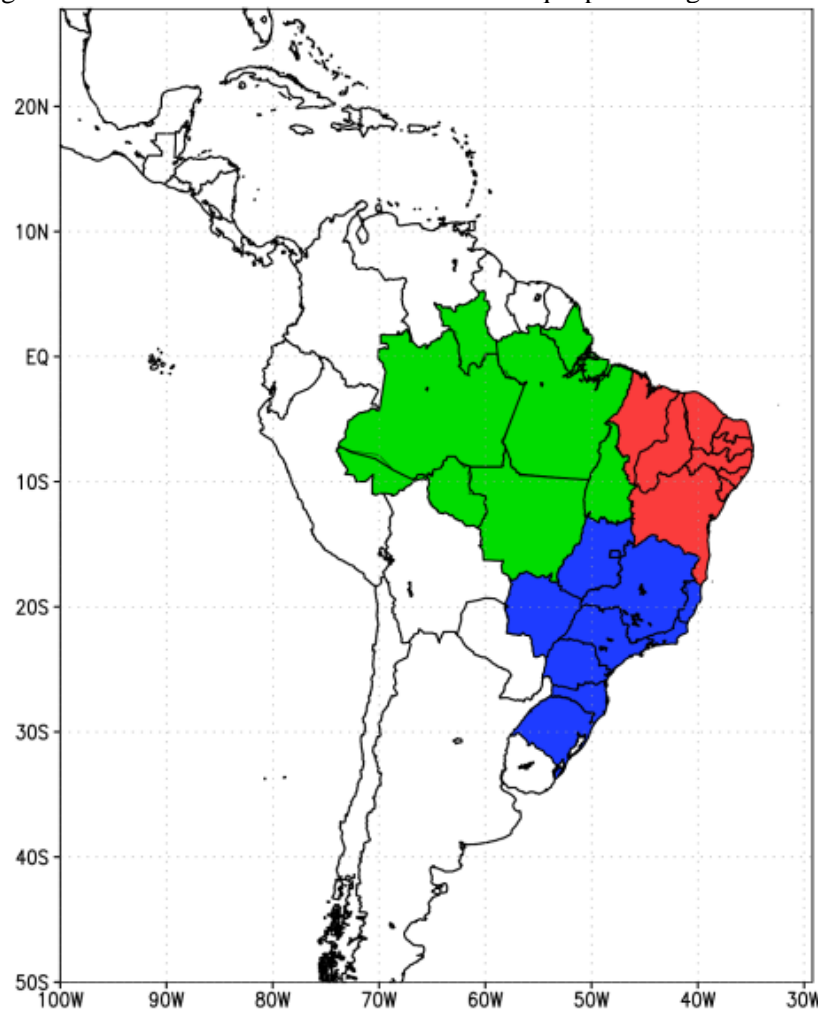
No Brasil, alguns centros de pesquisa têm realizado diversos estudos relacionados a previsões de tempo e clima em escala regional para o país e para a América do Sul em geral, a exemplo do Grupo de Estudos Climáticos (GrEC) da Universidade de São Paulo (USP) e do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE). Nos trabalhos do GrEC/USP, o *downscaling* tem sido realizado pelo modelo atmosférico *Regional Climate Model* (RegCM) com o uso de condições de contorno de modelos globais como o *Global NCEP Climate Forecast System* (CFSv2), por exemplo (CORRÊA et

al., 2018; AMBRIZI et al., 2019). Já a regionalização para a América do Sul pela equipe do CPTEC/INPE tem sido feita principalmente com o uso do modelo atmosférico de área limitada Eta, que utiliza condições de contorno provenientes de modelos globais como o *Global Eta Framework* e modelo de circulação geral oceano-atmosfera (CGCM), dentre outros (PILOTTO; CHOU; NOBRE, 2012; LATINOVIC et al., 2019).

Estudos realizados da bacia do rio São Francisco testaram a eficiência do modelo Eta na simulação e previsão de condições atmosféricas em diferentes resoluções espaciais e escalas temporais. Marengo et al. (2012) analisaram as variáveis temperatura e precipitação utilizando a resolução horizontal de 40 km para diferentes cenários de previsão, em intervalos anuais no período de 2011 até 2100. Já Vieira et al. (2015) realizaram comparações com as resoluções de 8 e 40 km do modelo, simulando precipitações com 72 horas de antecedência no período de 2005 a 2012. Em ambos os trabalhos os autores concluíram que os resultados obtidos foram relativamente satisfatórios para todas as resoluções e extensões temporais analisadas, provando a aplicabilidade do modelo na representação das condições atmosféricas na bacia do rio São Francisco.

A grade de previsões do modelo Eta possui resolução espacial horizontal de 0,4 graus na latitude e na longitude, o que corresponde a células quadradas de aproximadamente 40 km², cobrindo grande parte da América do Sul e uma porção da América Central (Figura 2.2). Quanto à resolução vertical, o modelo possui 38 camadas, sendo a primeira com 20 metros de extensão. Segundo Mesinger et al. (2016), a regionalização do modelo Eta pode ser feita com uma resolução horizontal de 5 a 40 quilômetros, dependendo do objetivo do estudo, o que permite uma melhor interpretação das condições atmosféricas locais e uma análise mais aprofundada de todas as suas características. Com relação às escalas temporais, o modelo regional permite simular e realizar previsões das condições da atmosfera tanto em curtos períodos de tempo quanto em intervalos mais longos, que podem ser de semanas a meses (incluindo previsões sazonais) (RESENDE; CHOU, 2014; MESINGER et al., 2016).

Figura 2.2 – Domínio do modelo Eta com destaque para a região do Brasil



Fonte: Chou et al. (2014)

2.2.2 Previsibilidade climática sazonal

É importante ressaltar que a confiabilidade das previsões climáticas está diretamente relacionada com uma boa representação das interações superfície-atmosfera, como cálculos de fluxos de água e energia (LLOPART et al., 2017). Além disso, a sazonalidade das condições atmosféricas apresenta alta complexidade e nem sempre a previsão de uma determinada anomalia em uma região poderá ser replicada. Ainda assim, devido à influência dos padrões de circulação atmosférica global nas condições climáticas regionais e à variação lenta das condições de contorno, em geral há uma persistência de condições semelhantes por alguns meses no futuro (SELUCHI; BEU; ANDRADE, 2017). Logo, devido a essa possibilidade de previsão, diversos estudos têm sido realizados a fim de alcançarem a excelência na previsibilidade climática com uma maior antecedência no tempo.

Em seus estudos, Yuan (2016) utilizou oito modelos da *NMME* com um conjunto (*ensemble*) de 99 membros na região da bacia de Yellow River e constatou que há mais diversidade no desempenho dos modelos para previsão sazonal da temperatura do que para precipitação. No geral, os modelos apresentaram maior acurácia para previsões de temperatura de até 6 meses de antecedência e previsões de precipitação de até 2 meses de antecedência (YUAN, 2016). Já Brown et al. (2018) utilizaram um modelo climático sazonal (POAMA) para realizar previsões das variáveis temperatura, radiação e precipitação, aplicando o *downscaling* para uma zona de cultivo australiana. Os autores concluíram que o modelo utilizado não foi capaz de simular adequadamente os padrões de precipitação diária em regiões com tendências de chuvas fortes, e recomendam aprimoramentos nos métodos de modelagem e *downscaling* para que se possam realizar previsões climáticas sazonais satisfatórias nessas áreas (BROWN et al., 2018).

Para a América do Sul, Pilotto, Chou e Nobre (2012) avaliaram a técnica de *downscaling* com o modelo regional Eta utilizando como condições de contorno o modelo de circulação geral da atmosfera do CPTEC e o modelo de circulação geral oceano-atmosfera (CGCM) também do CPTEC. Essa técnica, que consiste na regionalização dos dados atmosféricos permite que sejam obtidas informações mais precisas e detalhadas sobre domínios menores do globo. Os autores compararam as variáveis precipitação, fluxo de calor latente e fluxo de radiação de onda curta na superfície previstos pelos modelos com os dados observados, para o período de dezembro-janeiro-fevereiro. Segundo os mesmos, embora os modelos globais, em geral, possuam uma tendência de superestimar a precipitação para a América do Sul, a regionalização feita com o modelo Eta representou melhor o padrão atmosférico para o período estudado, resultando em menores erros sistemáticos para todas as variáveis analisadas (PILOTTO; CHOU; NOBRE, 2012).

Reboita et al. (2018) realizaram o *downscaling* para o Brasil utilizando modelos climáticos globais (CPTEC e CFSv2) e um modelo climático regional (RegCM4) nas versões 4.3 e 4.5. As previsões tiveram início dois meses antes do trimestre de interesse, totalizando em 94 simulações (72 com o modelo RegCM4-CFSv2 e 22 com o modelo RegCM4-CPTEC), sendo analisadas as variáveis precipitação e temperatura do ar. Com relação aos resultados, os autores concluíram que: para a região amazônica e nordeste, ambas as variáveis foram bem representadas (previstas) pelo modelo RegCM4-CPTEC; no sudeste, a precipitação foi melhor prevista pelo modelo RegCM4-CPTEC, enquanto que a temperatura do ar foi melhor representada na fase do ciclo anual pelo sistema CFSv2; já na região sul, esse último sistema

representou melhor as precipitações, enquanto a temperatura do ar foi melhor prevista pelo modelo RegCM4-CFSv2. Em resumo, os modelos regionais melhoraram as previsões climáticas sazonais para todas as regiões do Brasil, seja para a variável temperatura do ar, precipitação ou ambas.

Weber et al. (2015) realizaram análises em parte da bacia objeto de estudo deste trabalho, avaliando a previsibilidade sazonal da precipitação para a região do Alto São Francisco. Os autores utilizaram o modelo regional Eta para realizar previsões no período de 2001 a 2010, e essas sugeriram baixa acurácia do modelo na representação dos valores de precipitação nos períodos mais chuvosos. As previsões sazonais de precipitação foram, no geral, subestimadas pelo modelo, e apresentaram grande variabilidade espacial, provavelmente devido a topografia acentuada da região de estudo (WEBER et al., 2015). O modelo climático utilizado indicou maior acurácia nas previsões sazonais quando houve persistência das anomalias atmosféricas por um maior período de tempo, a exemplo dos anos de 2005 e 2006, mostrando uma influência significativa das condições de Anomalia de Temperatura da Superfície do Mar (ATSM) no Pacífico nas previsões sazonais do Alto São Francisco.

Ainda que a atmosfera seja um ambiente caótico composto por processos não lineares, e as previsões de precipitação estejam sujeitas a incertezas decorrentes da sensibilidade às condições iniciais e às configurações dos parâmetros (KUWAJIMA et al., 2019), estudos recentes provaram que a previsão por conjunto (*ensemble forecast*) têm apresentado resultados positivos, por permitir avaliar o risco de eventos extremos (FAN; MELLER; COLLISCHONN, 2015; DAOUD et al., 2016; YOSSEF et al., 2017). Nesse tipo de previsão são consideradas diversas condições iniciais ao invés de apenas uma, a fim de se obter, como resultado, um intervalo de possíveis cenários (BENNETT et al., 2016). Mais especificamente, as simulações são realizadas utilizando diferentes modelos atmosféricos, ou adotando diferentes condições iniciais em um único modelo, para que possam representar alguns possíveis estados da atmosfera em um determinado período de tempo, gerando um conjunto de previsões que considere as variações mais significativas do clima e do tempo (SILVA; TUCCI; COLLISCHONN, 2006; MELLER et al., 2014).

Em geral, os desenvolvimentos e consequentes melhorias da representação dos modelos climáticos regionais, especialmente se tratando das previsões climáticas sazonais, são fundamentais para avanços na gestão dos setores que necessitam de um conhecimento das condições atmosféricas com maior antecedência no tempo, a exemplo dos setores de agricultura e de gerenciamento de recursos hídricos (HARTMANN et al., 2016; KLEMM; MCPHERSON,

2017; SOARES; DALY; DESSAI, 2018). O conhecimento prévio de variáveis como temperatura e precipitação permite estimar a vulnerabilidade hídrica de regiões estratégicas a tempo de se proporem medidas de adaptação a extremos hidrológicos. Nesse sentido, estudos de previsões sazonais de vazão foram sendo desenvolvidos, para uma determinada região, à medida em que a previsibilidade climática sazonal foi sendo aperfeiçoada na mesma.

2.3 Previsão hidroclimática

A previsão hidroclimática se trata, essencialmente, da simulação de vazões com certa antecedência no tempo utilizando variáveis atmosféricas obtidas das previsões climáticas. Essa simulação é possível, portanto, por meio da integração de modelos atmosféricos e hidrológicos, em que o primeiro fornece os dados de entrada para o segundo. Os avanços na previsão de vazões de longo prazo só foram possíveis devido às melhorias nas metodologias de previsibilidade climática sazonal, principalmente com relação às projeções climáticas regionais.

O conhecimento das condições atmosféricas de uma determinada região com maior detalhamento e antecedência no tempo se tornou uma ferramenta essencial para a gestão dos recursos hídricos, sendo útil não só para a mitigação de problemas causados por eventos extremos, mas também para a proposição de medidas que visem a adaptação da região frente a possíveis vulnerabilidades futuras (KUWAJIMA et al., 2019).

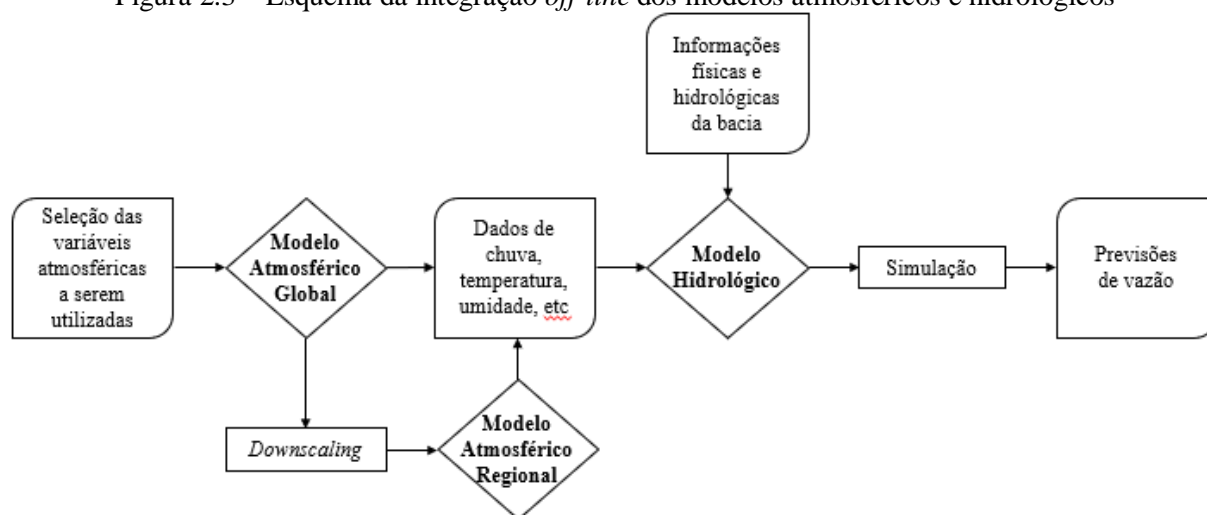
2.3.1 Integração de modelos hidrológicos e atmosféricos

A utilização de modelos hidrológicos dirigidos por variáveis oriundas de modelos atmosféricos permitiu grandes avanços nos estudos de hidrologia, principalmente na avaliação de eventos extremos de cheia e seca (KAY et al., 2015). Na área de previsão de vazões, os modelos climáticos fornecem dados simulados das condições atmosféricas futuras globais e/ou regionais, que servem como variáveis de entrada para projeção das vazões a curto, médio ou longo prazo. Embora bastante produtiva, essa metodologia de integração dos modelos não é tão simples de se utilizar, e depende de diversos fatores para que as simulações correspondam à realidade da área de estudo.

Chen et al. (2011) abordam que os principais problemas da incorporação dos modelos atmosféricos com modelos hidrológicos consistem tanto na escolha dos próprios modelos quanto na seleção e especificação dos dados de entrada, além de incertezas na calibração dos

parâmetros. Dessa forma, é recomendado que o usuário tenha um conhecimento mínimo prévio da área de estudo, além de certa experiência na manipulação dos modelos. Embora seja possível fazer a integração dos modelos hidrológicos e atmosféricos de forma acoplada, ou seja, em que os modelos interajam simultaneamente, grande parte dos estudos de previsão hidroclimática utilizam o método *off-line*, em que as simulações são realizadas e corrigidas primeiramente no modelo atmosférico, e depois servem como dados de entrada no modelo hidrológico. A exemplo dessa integração *off-line*, têm-se os trabalhos de Fiseha et al. (2014), Fuka et al. (2014), Mizukami et al. (2016) e Hattermann et al. (2017), e um esquema é apresentado de forma simplificada na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Esquema da integração *off-line* dos modelos atmosféricos e hidrológicos



A previsão hidroclimática de vazões pode ser definida, portanto, como a previsão de vazões utilizando como dados de entrada estimativas da previsão da precipitação, bem como de outras variáveis atmosféricas. Em seus estudos, Silva, Tucci e Collischonn (2006) provaram a eficácia da integração do modelo atmosférico Eta com o modelo hidrológico MGB-IPH, que posteriormente foram utilizados nos estudos de Adam et al. (2015), Fan et al. (2016c) e Siqueira et al. (2016b). Os dois últimos trabalhos, aliás, utilizaram satisfatoriamente essa integração na previsão de cheias por conjunto, que tem se mostrado uma ferramenta essencial na aprimoração das previsões hidrológicas tanto a curto quanto a médio prazo (SHARMA et al., 2019).

Entretanto, a previsão hidroclimática gera muitas incertezas, que podem ser causadas por diversos fatores como a inconsistência ou indisponibilidade de alguns dados de entrada, a inexperiência do usuário no emprego das variáveis ou as imperfeições dos modelos atmosféricos e hidrológicos escolhidos (KUWAJIMA et al., 2019). Essas incertezas, porém, podem ser minimizadas tanto no momento em que os dados de entrada são inseridos no modelo

hidrológico (por meio de correções estatísticas dos dados atmosféricos), quanto após a realização das previsões, por meio da estimativa dos erros (ou resíduos) das previsões. Contudo, muitas vezes os erros sistemáticos gerados pelos modelos atmosféricos tendem a ser compensados pelos erros dos modelos hidrológicos, não sendo necessária nesses casos a correção das previsões.

2.3.2 Previsão hidroclimática de longo prazo (sazonal)

A seguir são apresentados estudos recentes relacionados aos avanços nas previsões de vazões de longo prazo em virtude dos desenvolvimentos da previsibilidade climática sazonal, principalmente com a evolução dos modelos atmosféricos regionais.

Em seus estudos, Yuan, Wood e Ma (2015) discutiram acerca dos avanços na previsão hidrológica sazonal com base em modelos climáticos, incluindo previsões por conjunto (*ensemble forecast*), previsão hidrológica contínua, *downscaling* dinâmico (com melhor representação das conexões oceano-atmosfera) e tratamento dos dados hidrológicos pós-processamento das previsões sazonais. Os autores inferiram que a previsão de vazões em escalas de tempo mensais a sazonais necessitam de informações detalhadas das condições iniciais da superfície terrestre, assim como de previsões atmosféricas que representem fielmente as condições de contorno principalmente de grandes precursores climáticos como oscilação sul do El Niño (*El Niño Southern Oscillation – ENSO*).

Para a região do Reino Unido, Bell et al. (2017) exploraram o potencial de previsão hidrológica sazonal, uma vez que foram realizadas previsões climáticas sazonais para o Atlântico Norte e para o norte da Europa com dados confiáveis e passíveis de serem usados. Os autores utilizaram dados de precipitação diária prevista pelo modelo GloSea5 como entrada em um modelo hidrológico distribuído, e obtiveram previsões consistentes para um período de até três meses de antecedência. Além disso, constataram que as informações espaciais contidas nesse último modelo podem ser empregadas para fornecer condições de contorno iniciais para modelos hidrológicos de previsão mais simples, alimentados por previsões de precipitação mensais de baixa resolução.

Ainda na Europa, Greuell, Franssen e Hutjes (2019) utilizaram a metodologia de *hindcast* (ou *backtest*) para realizar previsões sazonais de vazão, que consiste basicamente na inserção de dados de entrada conhecidos (ou bem estimados) em um modelo de previsão para comparar se os valores de saída simulados correspondem aos resultados já conhecidos

(CALVIN et al., 2017). As variáveis atmosféricas foram simuladas utilizando a técnica de *ensemble* por um sistema de previsão sazonal do Centro Europeu de Previsão Meteorológica de Médio-Prazo (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF). A variável temperatura mais bem prevista que a precipitação para períodos mais longos, e isso afetou significativamente as previsões de evapotranspiração (GREUELL; FRANSSEN; HUTJES, 2019). Outras condicionantes que interferiram na eficiência das previsões de vazão sazonais foram as condições iniciais de neve e umidade do solo, provenientes de eventos anteriores e armazenadas na memória hidrológica da área de estudo, as quais os autores também recomendam ter mais atenção durante a manipulação dos dados.

Outros autores que utilizaram a técnica de previsão por conjunto (*ensemble forecast*) foram Singh (2016) e Zhao, Schepen e Wang (2016). Singh (2016) explorou a aplicabilidade das previsões de vazão por conjunto em bacias hidrográficas da Nova Zelândia, baseado no pressuposto de que os padrões climáticos futuros refletiriam os observados em dados históricos passados. Para tanto, foi utilizado o modelo hidrológico TopNet, e as previsões resultantes salientaram a incerteza intrínseca do clima, sendo os melhores resultados obtidos com três meses de antecedência durante o período do verão. Já Zhao, Schepen e Wang (2016) utilizaram uma abordagem de probabilidade conjunta bayesiana (*Bayesian joint probability*) para produzir previsões sazonais por conjunto em 23 bacias australianas. As previsões foram geradas com até três meses de antecedência durante o período de 1982 e 2011, usando dados históricos de vazão e variáveis climáticas como preditores. Os autores destacaram que a precisão das previsões de vazão foram diminuindo à medida que a resolução temporal aumentava, sendo os melhores resultados obtidos para o primeiro mês. Ainda assim, a técnica de previsões por conjunto em ambos os trabalhos contribuiu consideravelmente para a melhoria nas previsões de vazão a longo prazo.

No Brasil, Franco et al. (2018) e Pilz et al. (2019) realizaram previsões sazonais de extremos hidrológicos, mais especificamente para cheias no rio Xingu/PA e para secas na região do semiárido nordestino, respectivamente. Os primeiros autores constataram que a variabilidade fluviométrica do rio Xingu é influenciada diretamente tanto pela ocorrência de precipitações sobre a bacia quanto de padrões de TSM no Pacífico e no Atlântico. Quanto aos modelos hidrológicos desenvolvidos para serem utilizados nesse trabalho, o que obteve mais sucesso na predição das vazões sazonais foi um modelo estatístico de regressão linear múltipla, que levou em conta as variáveis TSM e precipitação na previsão satisfatória para os meses de março-abril-maio (FRANCO et al., 2018). Por sua vez, Pilz et al. (2019) utilizaram tanto

modelos que representam processos hidrológicos intrínsecos quanto relações estatísticas que exploram a correlação entre as variáveis atmosféricas e hidrológicas. As duas abordagens apresentaram desempenhos semelhantes, embora tenha sido comprovado que a estimativa de recarga subterrânea foi insuficientemente representada pelo primeiro modelo, que também sofreu influência de condições antecedentes de umidade.

3. METODOLOGIA

O estudo de caso do presente trabalho é a bacia hidrográfica do rio São Francisco, localizada entre as coordenadas 7°17' e 20°50' de latitude sul e 36°15' e 47°39' de longitude oeste, contemplando uma área de aproximadamente 638 mil km² que corresponde a 8% do território do Brasil (Figura 3.1). A bacia abrange 507 municípios de sete unidades de federação, sendo elas: Minas Gerais (MG), Goiás (GO), Distrito Federal (DF), Bahia (BA), Pernambuco (PE), Sergipe (SE) e Alagoas (AL). O rio principal da bacia, o São Francisco, tem sua nascente localizada na Serra da Canastra no município de São Roque de Minas (MG) e percorre cerca de 2700 km até desaguar no Oceano Atlântico, entre os estados de Sergipe e Alagoas. Segundo o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (CBHSF, 2016), a bacia pode ser dividida em quatro regiões fisiográficas (Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco) e subdividida em 27 sub bacias (Figura 3.2). As características principais de cada uma dessas regiões, como tipo de clima (segundo classificação Köppen), tipos de solo, temperaturas (máxima e mínima) e precipitação médias anuais, dentre outras, são apresentadas na Tabela 3.1. Os dados indicados pelo CBHSF (2016) correspondem ao período de 1961 a 2014.

Figura 3.1 – Localização da bacia hidrográfica do Rio São Francisco

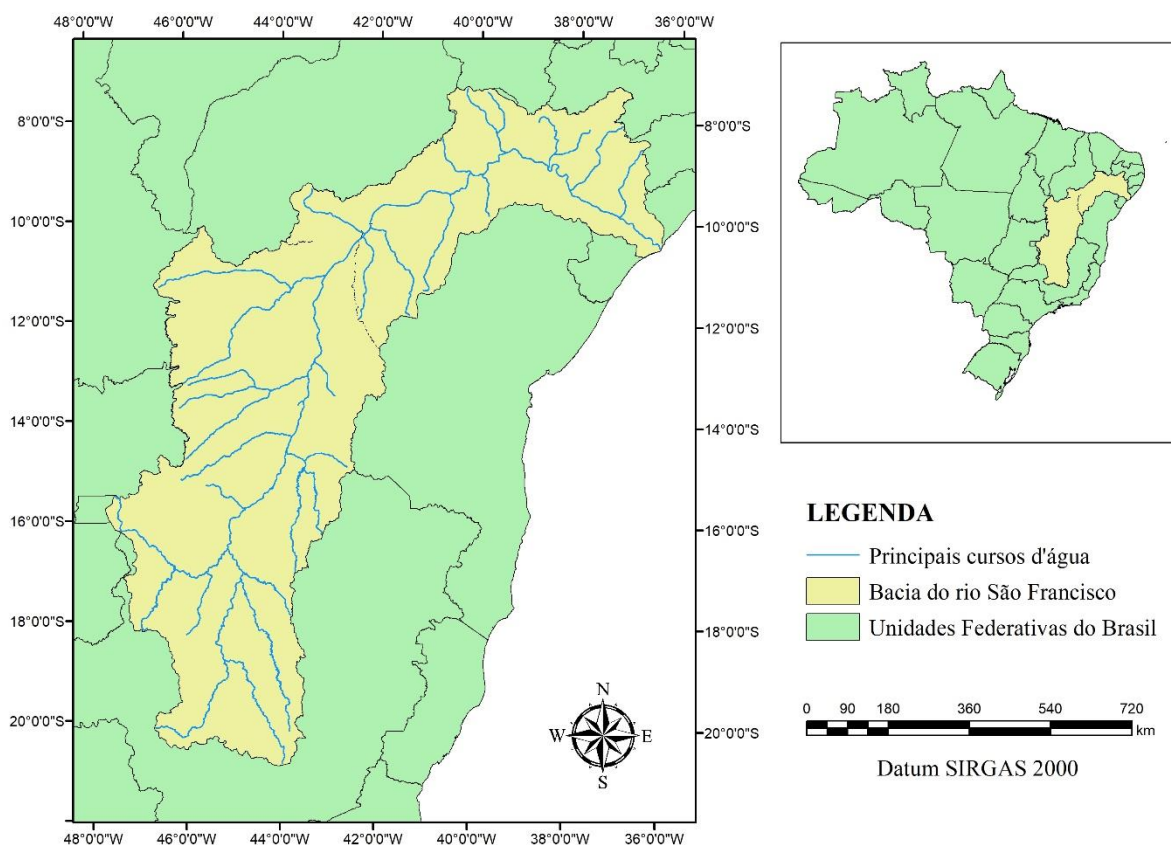
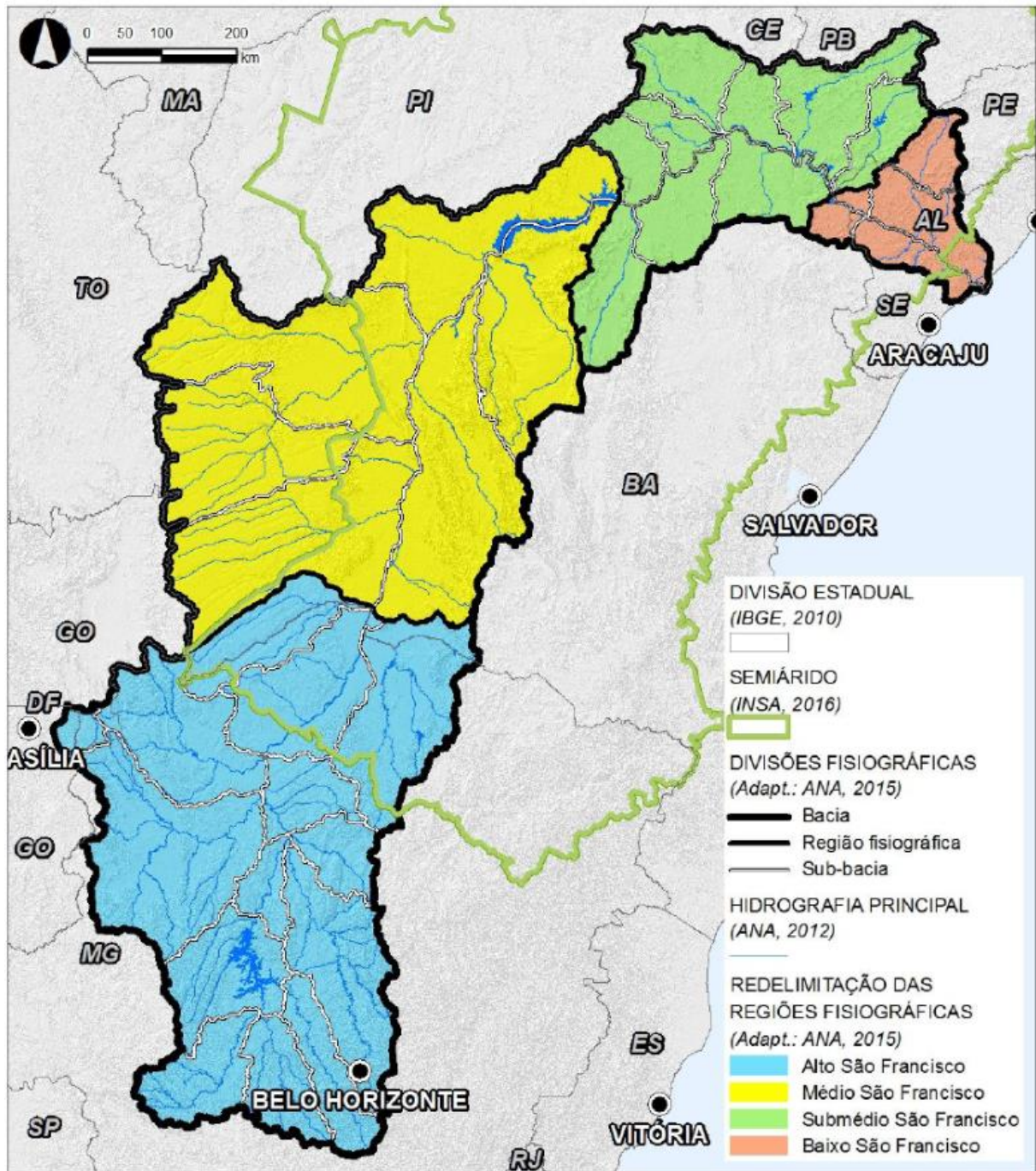


Figura 3.2 – Bacia hidrográfica do Rio São Francisco dividida em regiões fisiográficas e sub bacias



Fonte: CBHSF (2016)

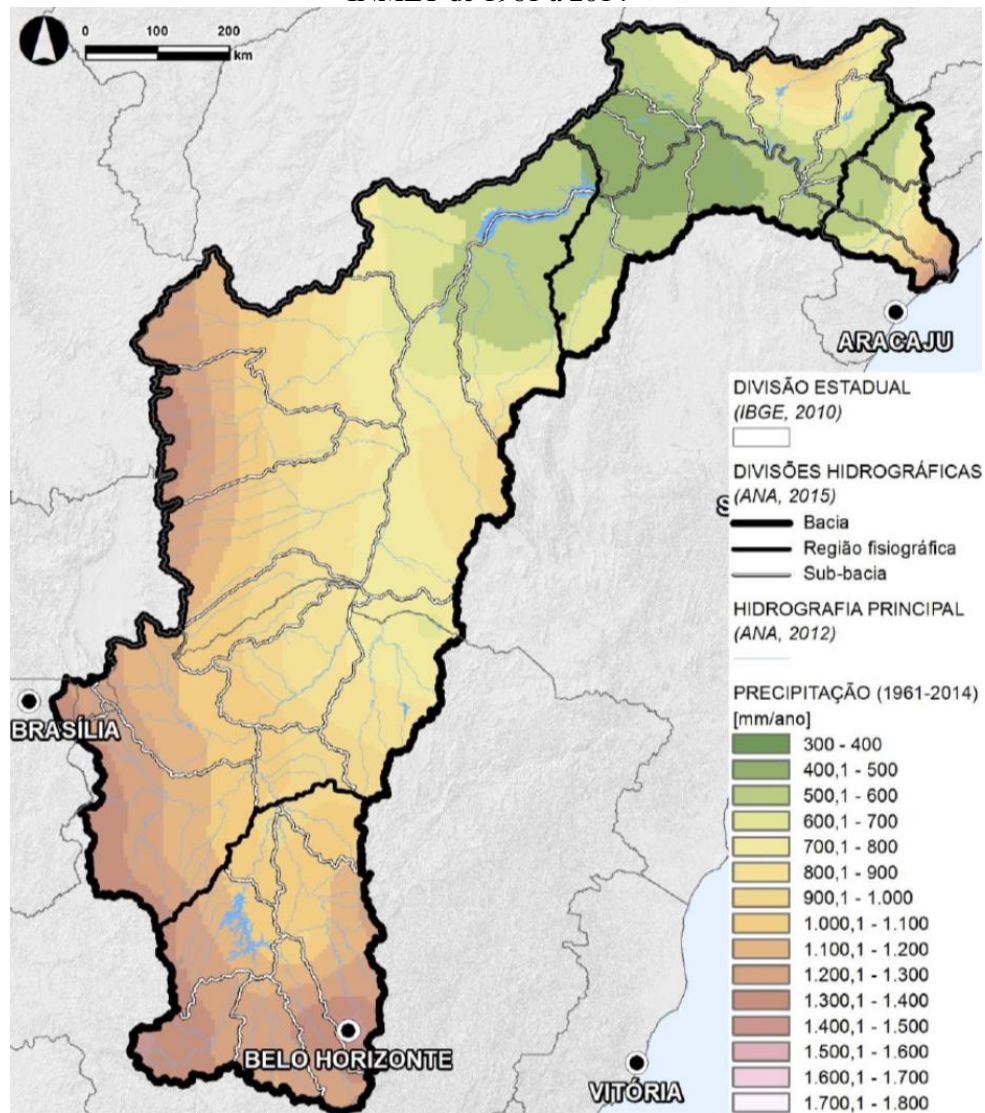
Tabela 3.1 – Características das regiões fisiográficas da bacia do rio São Francisco

CARACTERÍSTICA	REGIÃO FISIAGRÁFICA			
	ALTO	MÉDIO	SUBMÉDIO	BAIXO
Clima predominante (classificação de Köppen)	Aw (quente e úmido, com chuvas de verão). O trimestre mais chuvoso (de novembro a janeiro) concentra 60% do total de chuvas	Aw (quente e úmido), com variação climática BShw (semiárido)	BShw (semiárido)	AS (quente e úmido, com chuvas de inverno). Zonas a noroeste do tipo BSh (semiárido com curta estação chuvosa no outono/inverno)
Temperatura média anual máxima (°C)	29,0	31,2	30,9	31,2
Temperatura média anual mínima (°C)	16,0	18,6	20,2	20,8
Precipitação média anual (mm)	1295,0	990,0	583,0	759,0
Evaporação média anual (mm/dia)	3,8	5,3	6,9	5,1
Comprimento total da rede de drenagem (km)	24539,0	67926,0	23479,0	5713,0
Comprimento do curso d'água principal (km)	692,0	1224,0	558,0	223,0
Altitude	Entre 450 e 1850 metros, e 86% da região entre 600 e 1200 metros	Entre 350 e 2050 metros, e 90% da região entre 400 e 900 metros	Entre 0 e 1300 metros, e 84% da região entre 300 e 650 metros	Entre 0 e 1150 metros, e 81% da região entre 0 e 450 metros
Declives (menores que 8%)	Cerca de 53% da região	Cerca de 85% da região	Cerca de 89% da região	Cerca de 77% da região
Tipos de solo (em ordem decrescente de predominância, superiores a 2%)	Cambissolos, latossolos, argissolos e neossolos	Latossolos, neossolos, cambissolos e argissolos	Luvisolos, neossolos, planossolos, latossolos, argissolos e cambissolos	Planossolos, neossolos, argilossolos, espodossolos, latossolos
Demanda hídrica (% de vazão de retirada anual)	Cerca de 38% para irrigação e 29% e 27% para abastecimento urbano e industrial, respectivamente	Cerca de 91% para irrigação, e 4% ao abastecimento urbano	Cerca de 90% para irrigação, e 6% ao abastecimento urbano	Cerca de 85% para irrigação, e 8% ao abastecimento urbano

Fonte: adaptado de CBHSF (2016)

Especificamente em relação a precipitação média, sua distribuição espacial é apresentada na Figura 3.3, em que se pode observar de forma mais clara a alta variabilidade espacial dos valores de precipitação na bacia, associada à transição do úmido (na região sul da bacia) para o árido (na região norte).

Figura 3.3 – Distribuição da precipitação média na bacia do rio São Francisco utilizando dados do INMET de 1961 a 2014 ¹



Fonte: CBHSF (2016)

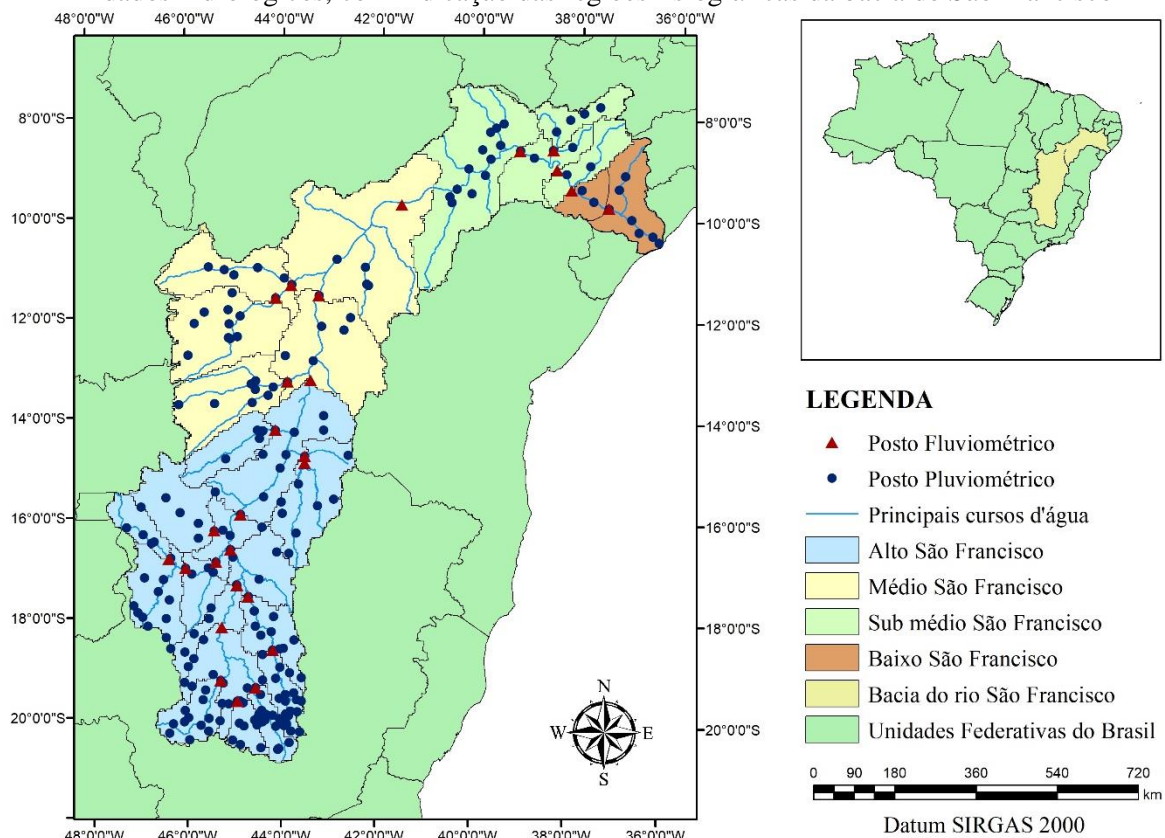
A modelagem hidrológica do presente trabalho foi realizada utilizando o modelo MGB-IPH devido à sua aplicabilidade para a bacia do Rio São Francisco, conforme descrito anteriormente no item 2.1.1. Inicialmente, foram realizadas simulações de vazão para

¹ A divisão da bacia do São Francisco nessa imagem é antiga, em que o Alto São Francisco correspondia a uma região de apenas sete sub bacias. Atualmente a região do Alto e Médio São Francisco correspondem às áreas definidas na Figura 3.2.

calibração e verificação do modelo, para melhor ajustá-lo à realidade da bacia em estudo. A calibração foi realizada por meio de simulações de vazão no período de janeiro de 1980 a dezembro de 1989 e verificadas para o período de janeiro de 1990 a dezembro de 2000. Alguns parâmetros fixos e calibráveis utilizados como dados de entrada nesse processo inicial de ajuste do modelo foram os mesmos obtidos por Silva (2005), não havendo, portanto, a necessidade de uma caracterização física e hidrológica mais aprofundada da bacia de estudo. Porém, o histórico de dados hidrológicos observados foi atualizado para o período de 1980 a 2018, uma vez que seriam utilizados tanto nas simulações de vazão para ajuste dos parâmetros calibráveis quanto nas previsões de vazão.

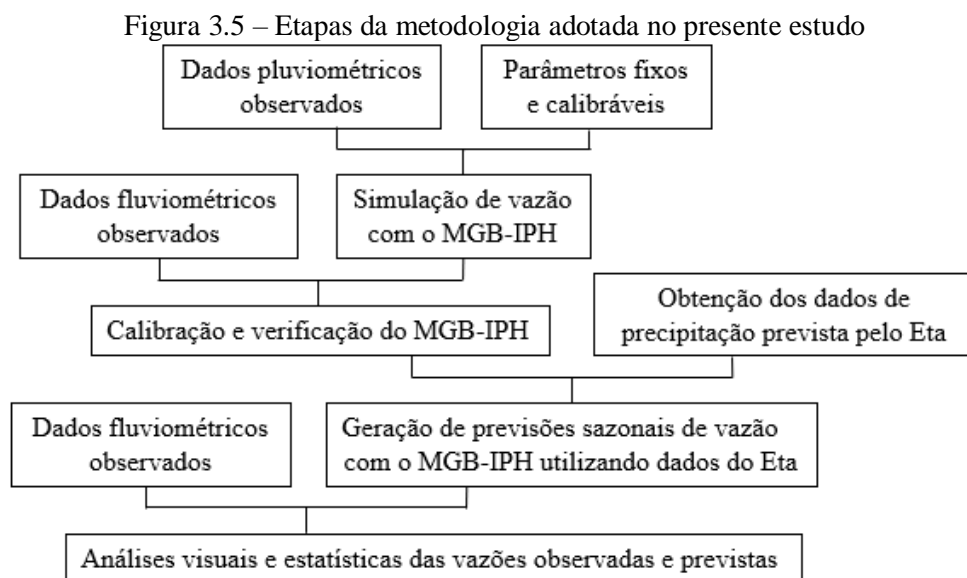
Com relação aos dados diários observados de precipitação, estes foram obtidos do banco de dados do site *Hidroweb* da ANA, sendo utilizados um total de 223 postos pluviométricos (Figura 3.4). A determinação dos postos a serem utilizados levou em consideração a confiabilidade de seus dados, sendo escolhidos todos aqueles localizados dentro da bacia do São Francisco, desde que possuíssem dados consistidos do período de janeiro de 1980 a dezembro de 2018, mesmo que incompletos, garantindo assim a representação da variabilidade espacial.

Figura 3.4 – Localização dos postos pluviométricos e fluviométricos selecionados para obtenção dos dados hidrológicos, com indicação das regiões fisiográficas da bacia do São Francisco



Já em relação aos dados diários observados de vazão, estes foram obtidos de séries históricas dos postos fluviométricos da ANA localizados dentro da bacia do rio São Francisco e no exutório de cada uma das 27 sub-bacias, totalizando, portanto, em 27 postos (Figura 4.1). É importante mencionar que, para as sub-bacias Três Marias, Sobradinho, Itaparica/Luiz Gonzaga e Paulo Afonso/Moxotó, foram utilizadas, como dados observados de vazão, as séries de vazões naturais dos aproveitamentos hidrelétricos no lugar dos valores medidos nos postos fluviométricos como nas demais sub bacias. Nessas séries são subtraídos os valores de vazão referentes aos usos consultivos, assim como os efeitos provocados pela operação dos reservatórios. Todos esses dados foram, posteriormente, interpolados para a grade de resolução do modelo hidrológico.

Além dos dados observados das estações da ANA, foram obtidos também dados de previsões sazonais de precipitação, dentre outras variáveis atmosféricas, geradas pelo modelo atmosférico Eta e fornecidos pelo CPTEC/INPE. Por fim, esses últimos dados foram utilizados como entrada no modelo hidrológico (já ajustado para a bacia) na geração de previsões sazonais de vazão para a bacia do São Francisco no período correspondente de 2001 a 2018. Toda a metodologia adotada para essa finalidade, baseada nos estudos de Silva (2005), é apresentada brevemente no esquema da Figura 3.5 e cada etapa realizada é descrita com maiores detalhes na sequência.



3.1 Simulação hidrológica para ajuste do MGB-IPH

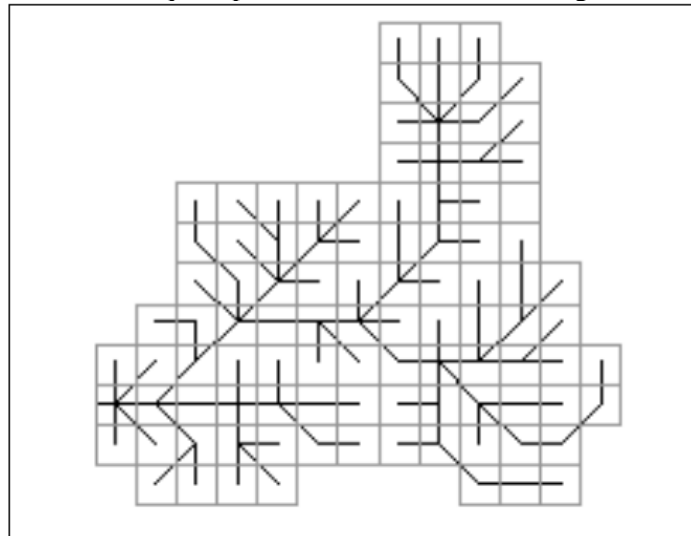
3.1.1 Estrutura do modelo hidrológico

O MGB – IPH (Modelo de Grandes Bacias) é um modelo semi conceitual distribuído, composto por módulos específicos para o cálculo dos processos físicos e hidrológicos de grandes bacias hidrográficas (geralmente com áreas maiores que 10.000 km²), representando, portanto, a variabilidade espacial das características da bacia (COLLISCHONN; TUCCI, 2001). Segundo os mesmos autores, a estrutura do MGB-IPH se baseou na estrutura do modelo LARSIM de Bremicker (1998 apud COLLISCHONN; TUCCI, 2001), com algumas adaptações, como nos módulos de evapotranspiração e de escoamento na rede de drenagem, que foram desenvolvidos inicialmente com base nos trabalhos de Shuttleworth (1993 apud COLLISCHONN; TUCCI, 2001) e Wigmosta et al. (1994 apud COLLISCHONN; TUCCI, 2001) e Tucci (1998 apud COLLISCHONN; TUCCI, 2001), respectivamente.

Embora existam atualizações do modelo, como evoluções na etapa de discretização da área de estudo e acoplamento a uma interface SIG, além de melhorias no cálculo do escoamento de fluxo (PONTES et al., 2017), para este estudo foi utilizada a versão original em que a bacia é subdividida em células quadradas conectadas entre si por canais de drenagem (Figura 3.6), uma vez que alguns dados de entrada e demais parâmetros fixos dessa versão já haviam sido ajustados para toda a bacia do rio São Francisco por Silva (2005). A utilização de uma versão antiga do modelo, no entanto, não apresentou prejuízos nos resultados do presente trabalho, cujo foco é analisar a previsibilidade de eventos extremos na bacia utilizando previsões sazonais de precipitação. Todos os parágrafos subsequentes relacionados à estrutura original do modelo foram obtidos de Collischonn e Tucci (2001), onde mais detalhes podem ser consultados.

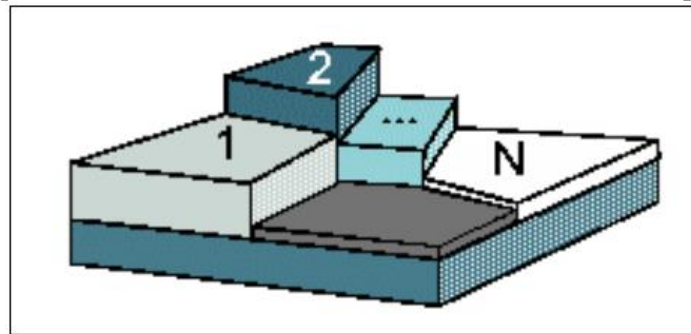
No MGB-IPH, a bacia hidrográfica é dividida em células quadradas de aproximadamente 10 x 10 km e cada uma dessas células é agrupada em blocos de acordo com o uso, tipo e cobertura do solo (Figura 3.7). A caracterização de cada bloco depende de uma série de parâmetros, como capacidade de armazenamento de água no solo e índice de área foliar da vegetação. No caso da bacia do São Francisco, essa foi dividida por Silva (2005) em 2502 células quadradas que posteriormente foram agrupadas em 27 sub-bacias (Figura 3.8), com base na localização de cada um dos postos fluviométricos utilizados nos cálculos de ajuste do modelo hidrológico e na análise das vazões.

Figura 3.6 – Exemplo de uma bacia hidrográfica dividida em células quadradas ligadas entre si por linhas que representam os canais de drenagem



Fonte: Collischonn e Tucci (2001)

Figura 3.7 – Células quadradas do MGB-IPH subdivididas em N blocos de uso, tipo e cobertura do solo

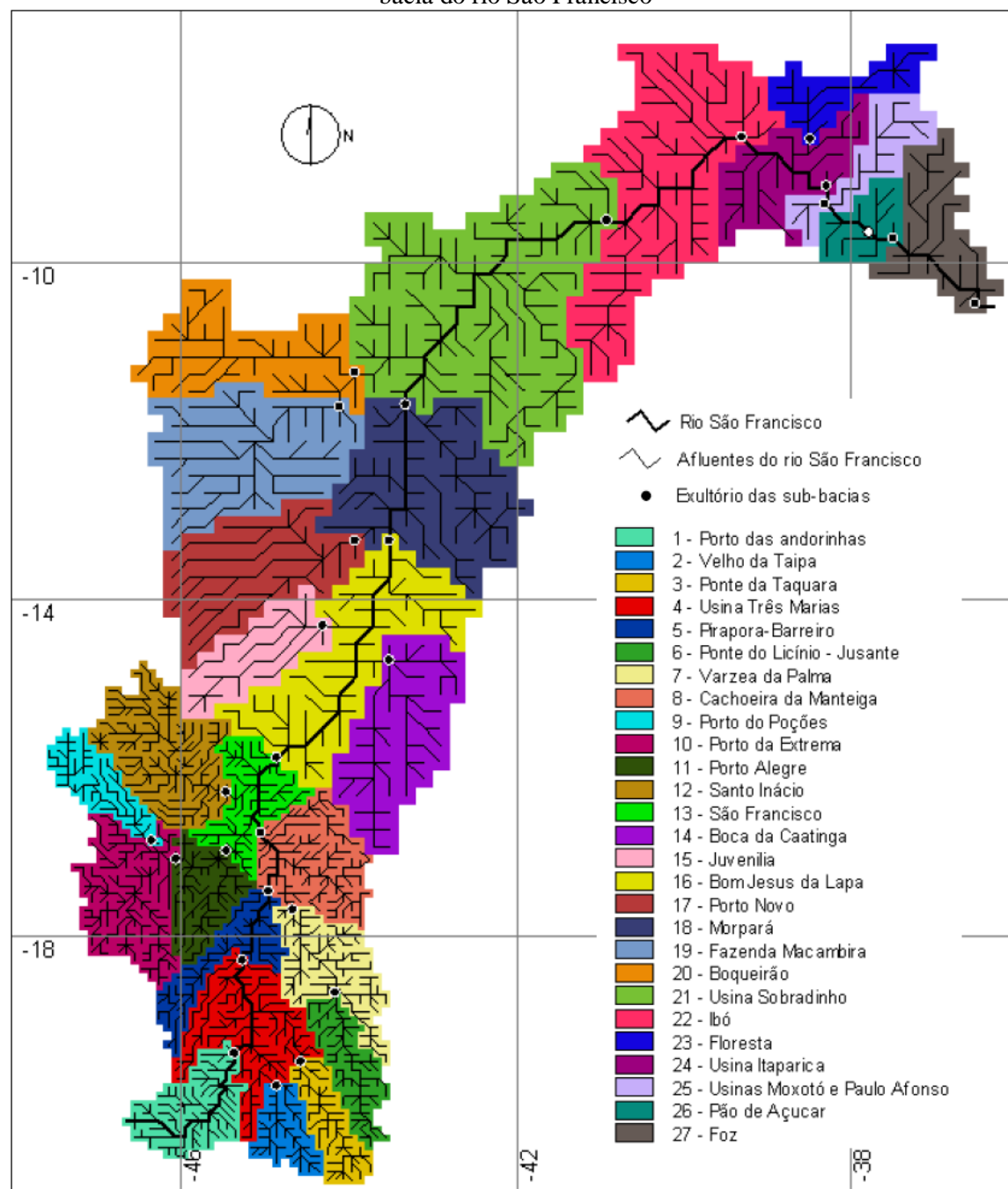


Fonte: Collischonn e Tucci (2001)

O MGB-IPH é ainda composto por quatro módulos distintos que representam os processos físicos da bacia por meio de fluxos verticais e horizontais, sendo eles: balanço de água no solo, evapotranspiração, escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo e escoamento na rede de drenagem. Os dois primeiros módulos ocorrem separadamente em cada célula, enquanto o terceiro módulo representa o fluxo horizontal no interior da célula até a rede de drenagem e o último o fluxo ao longo da rede de drenagem.

O balanço água no solo é determinado separadamente para cada bloco de uso, tipo e cobertura do solo (ou unidade de resposta hidrológica) de acordo com suas características e parâmetros. Cada unidade recebe uma precipitação (P), que é a precipitação incidente (PI) descontada da interceptação, sendo essa última representada por um reservatório cujo volume depende do tipo da cobertura vegetal, expressa em termos de índice de área foliar.

Figura 3.8 – Discretização em blocos de uso e ocupação do solo e rede de drenagem obtida para a bacia do rio São Francisco

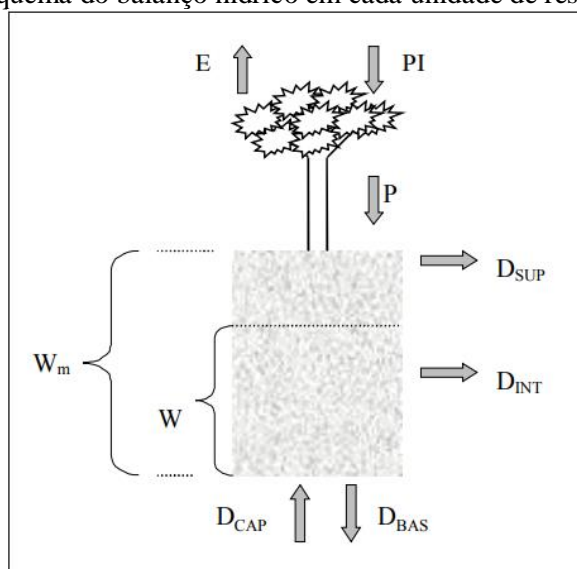


Fonte: Silva (2005)

Uma parcela do valor precipitado transforma-se imediatamente em escoamento superficial (D_{sup}), dependendo do estado de armazenamento de água no solo (W) e do armazenamento máximo de água no mesmo (W_m), com uma relação de probabilidade entre a umidade do solo e a fração de área saturada. O solo é drenado pelos processos de escoamentos subterrâneo (D_{bas}) e sub-superficial (D_{int}), que são gerados, respectivamente, por meio de relações de caráter linear e não-linear dependendo do armazenamento de água no solo, e então

sofre o processo de transpiração. Essa parcela transpirada, juntamente com a evaporação potencial da lâmina interceptada, definem a evapotranspiração (E), que é obtida pelo método de Penman-Monteith. Por fim, em alguns casos, o solo pode ainda receber um fluxo de umidade ascendente e todos esses processos são ilustrados na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Esquema do balanço hídrico em cada unidade de resposta hidrológica



Fonte: Collischonn e Tucci (2001)

Com relação às parcelas referentes ao escoamento superficial, sub-superficial e subterrâneo sofrem retardo e são amortecidas ainda interior de cada célula e, portanto, não atingem diretamente a rede de drenagem. Esses efeitos são representados no modelo por meio da propagação em reservatórios lineares referentes a cada um dos escoamentos, no caso: reservatório superficial (Q_{sup}), reservatório sub-superficial (Q_{int}) e reservatório subterrâneo (Q_{bas}). A propagação em cada um deles é dada por uma relação entre o volume de água armazenado e um parâmetro de retardo, cuja unidade pode ser em dias ou horas. Após a propagação em cada célula, o MGB-IPH realiza a propagação nos trechos de rio por meio do método de Muskingum-Cunge, cujos parâmetros estão associados com base em dados físicos de cada trecho, como comprimento, declividade, rugosidade e largura média da seção.

Quanto às variáveis de entrada do modelo, como precipitação, temperatura, umidade relativa, insolação, velocidade do vento e pressão atmosférica, essas são obtidas para cada uma das células quadradas do modelo por meio da interpolação dos dados de postos de observação mais próximos. As metodologias mais comumente utilizadas são as funções interpoladoras de Thiessen (vizinho mais próximo) e do inverso da distância ao quadrado.

3.1.2 Calibração e verificação do MGB-IPH

Com relação ao modelo MGB-IPH, a maioria dos parâmetros está relacionada à topografia da bacia, enquanto outros são definidos no próprio código fonte do modelo, como aqueles relacionados ao movimento da água no solo (COLLISCHONN et al., 2014). Entretanto, nem todos os parâmetros podem ser medidos, sendo necessária a calibração destes para que se ajustem à realidade da área de estudo. Dessa forma, os valores determinados para os parâmetros do modelo hidrológico devem apresentar uma boa correlação entre as vazões calculadas (obtidas por meio de simulações com o modelo hidrológico) e as observadas (séries históricas de postos fluviométricos).

Alguns parâmetros não são alterados no processo de calibração e são denominados parâmetros fixos, sendo estes relacionados à vegetação de cada Unidade de Resposta Hidrológica (URH) e utilizados no cálculo da evapotranspiração por meio da equação de Penman-Monteith. Uma lista desses parâmetros fixos, bem como suas descrições, é apresentada na Tabela 3.2. Já os parâmetros calibráveis do modelo hidrológico MGB-IPH são aqueles associados às propriedades físicas das URHs e que podem ser ajustados. Uma lista com esses parâmetros é apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.2 – Parâmetros fixos do modelo MGB-IPH

PARÂMETRO	DESCRIÇÃO
Índice de Área Foliar (IAF)	Parâmetro adimensional ($m^2 \cdot m^{-2}$) que expressa a relação entre a área das folhas de todas as plantas e da área de uma parcela do solo
Albedo	Parcela da radiação solar refletida ao atingir a superfície do solo, considerando sua cobertura vegetal
Resistência Superficial	Representa a resistência ao fluxo de umidade do solo, através das plantas até a atmosfera. Essa resistência é diferente para cada tipo de planta e depende de variáveis como umidade do solo, temperatura do ar e radiação recebida pela planta.
Altura do Dossel	Altura média da vegetação, utilizada para estimar a resistência aerodinâmica, que é inversamente proporcional ao fluxo de evapotranspiração. Essa resistência é considerada menor em florestas, onde a altura do dossel é maior, intensificando a turbulência do vento

Fonte: adaptado de Collischonn et al. (2014)

Tabela 3.3 – Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH

PARÂMETRO	DESCRIÇÃO
Capacidade de armazenamento do solo (Wm)	Capacidade de armazenamento de água no solo, em milímetros (mm)
Forma da relação entre armazenamento e saturação (b)	Parâmetro empírico e adimensional, que define a variabilidade da capacidade de armazenamento do solo em torno de Wm
Vazão durante a estiagem (Kbas)	Controla a vazão durante a estiagem, dado em milímetros (mm). Valores altos implicam em maior escoamento subterrâneo.
Quantidade de água que esco subsuperficialmente (Kint)	Controla a quantidade de água da camada de solo que esco subsuperficialmente, dado em milímetros (mm)
Forma da curva de redução da drenagem intermediária (XL)	Parâmetro adimensional que controla a forma da curva de redução da drenagem intermediária ou subsuperficial do solo
Fluxo do reservatório subterrâneo para a camada superficial (CAP)	Controla a possibilidade de retorno da água subterrânea para a camada de solo, dado em milímetros (mm)
Armazenamento residual (Wc)	Limita o armazenamento residual e subterrâneo, dado em milímetros (mm)
Calibração da propagação superficial (CI)	Parâmetro adimensional para calibração da propagação superficial nas minibacias
Calibração da propagação subsuperficial (CS)	Parâmetro adimensional para calibração da propagação subterrânea nas minibacias
Retardo do reservatório subterrâneo (CB)	Representa o retardo do reservatório subterrâneo em dias
Vazão de base (QB)	Representa o fluxo de base da minibacia em m ³ /s

Fonte: adaptado de Collischonn et al. (2014)

Segundo Bravo, Collischonn e Tucci (2009), a modelagem hidrológica requer vários conjuntos de parâmetros para representação do comportamento hidrológico da bacia, uma vez que um conjunto apenas não seria capaz de representar todos os processos envolvidos devido a incertezas tanto nos dados utilizados quanto na estrutura do modelo. Por exemplo, um conjunto de parâmetros pode representar bem as estiagens, enquanto outro conjunto pode apresentar boa representação dos eventos de cheia, e a combinação desses conjuntos pode ampliar a possibilidade de obter um bom ajuste para todos os extremos hidrológicos da bacia (BRAVO; COLLISCHONN; TUCCI, 2009).

Para ajuste dos parâmetros calibráveis, foram realizados dois processos de calibração: a automática e a manual. Para a calibração automática foi utilizada a metodologia dos algoritmos

genéticos multi-objetivo baseados em algoritmos evolucionários, que são técnicas numéricas de otimização e busca inspirados por mecanismos de seleção natural e genética (BRAVO; COLLISCHONN; TUCCI, 2009). O algoritmo genético multi-objetivo empregado é o *Multiobjective Complex Evolution Method* — Universidade de Arizona (MOCOM-UA), que já vem incluso na versão do MGB-IPH, descrito com detalhes no trabalho de Collischonn e Tucci (2003).

No processo de calibração automática, inicialmente foram inseridos no modelo hidrológico os parâmetros obtidos por Silva (2005) e os dados hidrológicos diários correspondentes a pelo menos uma década antes do período que será adotado para a previsão de vazões, sendo simuladas as vazões para todas as 27 sub-bacias do rio São Francisco. A avaliação da calibração foi feita de forma visual, por meio de análise subjetiva dos hidrogramas calculados e observados, e com o uso de funções objetivo para medir o desempenho da calibração. As medidas de desempenho utilizadas foram o coeficiente de Nash-Sutcliffe das vazões calculadas e observadas (NS), coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões calculadas e observadas (NSLog) e erro relativo de volume total dos hidrograma (ΔV), cujas descrições são apresentadas na Tabela 3.4.

No caso de os resultados das funções objetivo não serem satisfatórios, ou seja, as vazões calculadas não representaram bem as vazões observadas, o processo de calibração deverá ser repetido até que se obtenha um resultado aceitável para o objetivo do trabalho. O algoritmo do modelo hidrológico realiza múltiplas iterações que geram diversos conjuntos de coeficientes para serem multiplicados pelos parâmetros calibráveis. Dessa forma, deve-se escolher o mais representativo desses conjuntos com o objetivo de otimizar os resultados das medidas de desempenho.

Após a calibração automática foi realizada a calibração manual para a correção de eventuais incertezas nos hidrogramas calculados. A alteração dos parâmetros foi baseada na observação e comparação desses hidrogramas com os observados, até que o primeiro fosse ajustado de maneira que represente da melhor forma possível o comportamento hidrológico da bacia. Por fim, realizadas as calibrações automática e manual para a década adotada, estas foram verificadas para um intervalo de tempo (década) diferente, porém também anterior ao utilizado para a geração de previsões de vazão. Logo, foram realizadas novamente as simulações de vazão com o modelo hidrológico, utilizando por sua vez os parâmetros adotados após as calibrações, e as análises dessas vazões por meio da aplicação das mesmas medidas de

desempenho, com o objetivo de averiguar se o modelo conseguiu representar bem o comportamento hidrológico da bacia para qualquer período.

Tabela 3.4 – Medidas de desempenho consideradas na calibração do MGB-IPH

FUNÇÃO OBJETIVO	DESCRIÇÃO
$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (QC_i - QO_i)^2}{\sum_{i=1}^n (QC_i - QO_m)^2}$	Coeficiente adimensional, cujo valor máximo é igual a 1, considerado o ajuste perfeito. É muito influenciado pelas vazões máximas (cheias). Em geral, valores acima de 0,7 são considerados satisfatórios. Valores inferiores a 0,6 podem indicar falhas ou pouca cobertura espacial dos dados de precipitação
$NSlog = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(QC_i) - \log(QO_i))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(QC_i) - \log(QO_m))^2}$	Coeficiente adimensional que também apresenta ajuste perfeito quando o valor é igual a 1 (valor máximo). É mais sensível às estiagens (vazões mínimas).
$\Delta V = \frac{\sum_{i=1}^n QC_i - \sum_{i=1}^n QO_i}{\sum_{i=1}^n QO_i}$	Coeficiente adimensional, apresentado em termos percentuais. Valores ideais devem permanecer dentro da faixa de -10% e 10%. Não possui valor máximo nem mínimo, e não é influenciado de maneira diferenciada pelos períodos de cheia ou estiagem. É uma forma de avaliar se existe um desvio sistemático de superestimativa ou subestimativa da vazão calculada.
<p>Onde: QC_i é a vazão calculada num intervalo de tempo i; QO_i é a vazão observada neste mesmo intervalo de tempo; n é o número de intervalos de tempo e QO_m é a média das vazões observadas no período de n intervalos de tempo</p>	

Fonte: adaptado de Collischonn et al. (2014)

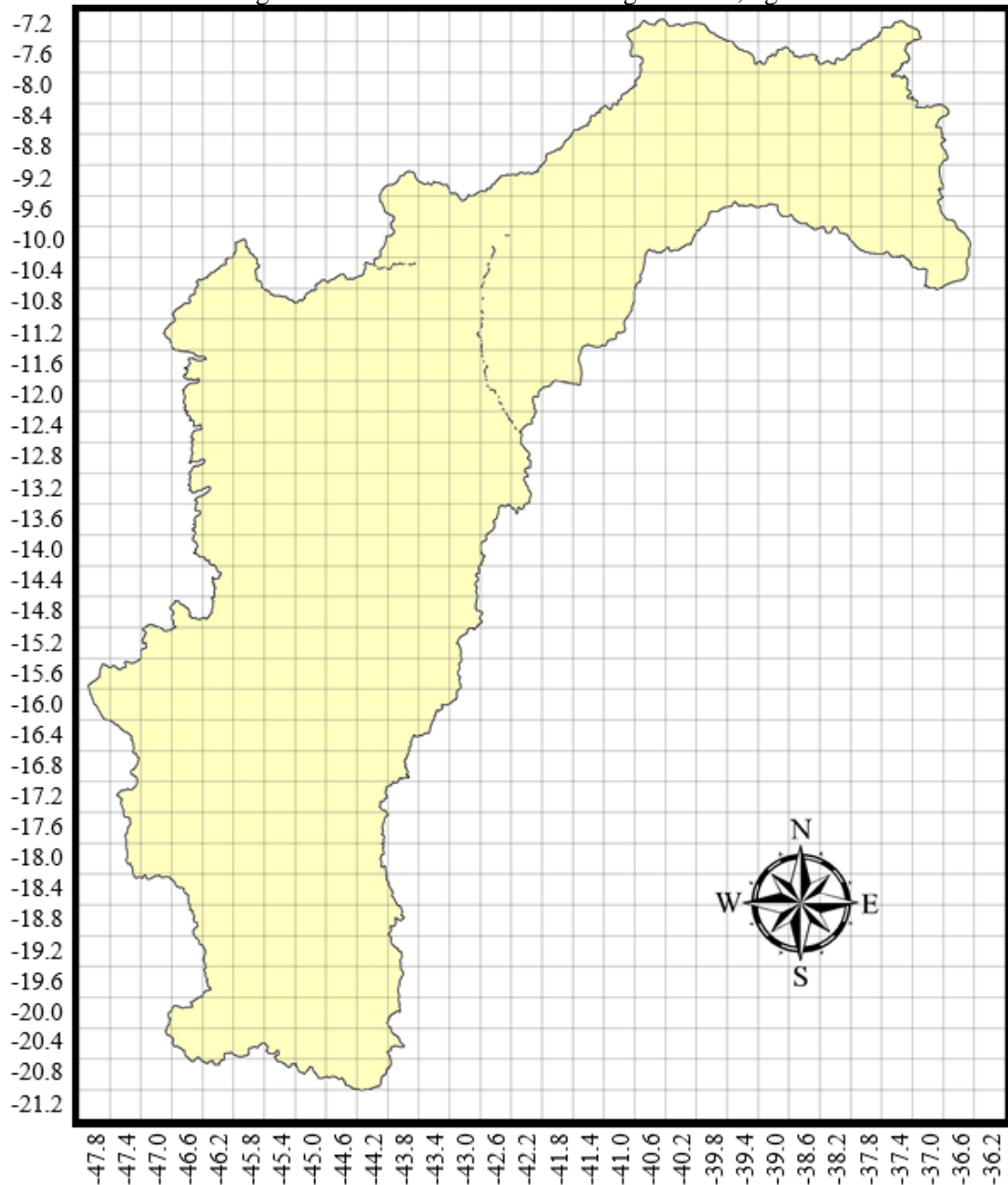
3.2 Previsões sazonais de vazão para o Rio São Francisco

3.2.1 Geração do histórico de previsões hidrológicas

As precipitações previstas a serem utilizadas como dado de entrada no MGB-IPH para geração das previsões de vazão sazonais foram geradas pelo modelo atmosférico regional Eta, com condições de contorno laterais provenientes do modelo global AGCM a partir de anomalias de TSM persistidas, e disponibilizados pela equipe do CPTEC/INPE.

A dimensão espacial analisada corresponde aproximadamente às latitudes 7°S e 21°S e longitudes 36° O e 47° O, abrangendo toda a bacia do rio São Francisco (Figura 3.10). Os dados referem-se a previsões sazonais de precipitação, radiação solar, umidade relativa do ar próxima à superfície e velocidade do vento, temperatura e pressão atmosférica na superfície, com quatro meses de antecedência e equivalentes ao período de janeiro de 2001 a dezembro de 2018. A metodologia adotada foi a de previsão por conjunto (*ensemble forecast*) utilizando 5 condições iniciais com intervalos de 24 horas entre elas, iniciando no dia 13 e terminando no dia 17 de cada mês.

Figura 3.10 – Resolução espacial do modelo atmosférico regional Eta para a região da bacia hidrográfica do rio São Francisco com grade de 0,4 graus



Para utilização dos dados de precipitação prevista do modelo Eta como dado de entrada no modelo hidrológico, estes foram também interpolados para os pontos de grade de cada célula do MGB-IPH. Os dados de precipitação utilizados foram diários e para as análises foram consideradas tanto os valores diários quanto os totais acumulados ao longo de N dias, onde N variou de 30 a 120 dias, aproximadamente, correspondendo respectivamente a um e a quatro meses de previsão, sendo este último o horizonte máximo.

Uma vez realizada a preparação das previsões sazonais de precipitação do modelo regional, estas foram utilizadas como dados de entrada no modelo hidrológico, já calibrado e verificado, para a geração de previsões de vazão com até quatro meses de antecedência. As previsões de vazão foram realizadas para cada uma das 27 sub bacias do rio São Francisco, no período de janeiro de 2001 a dezembro de 2018, sendo iniciadas sempre no 1º dia de cada mês e estendendo-se pelos quatro meses seguintes com intervalos de tempo de 24 horas.

Até o último dia antes do início da previsão foram utilizadas as precipitações observadas como dados de entrada no modelo hidrológico, já interpoladas para a grade do modelo. A partir do primeiro dia de previsão, foram então utilizadas as precipitações previstas pelo modelo atmosférico regional. Além dos dados de precipitação observada foram utilizados também outros dados observados como as vazões dos rios, obtidas de postos fluviométricos, para atualização do modelo hidrológico antes do início das previsões de vazão. Esse procedimento foi repetido para cada um dos membros do conjunto de previsões do modelo atmosférico regional, resultando em cinco hidrogramas diferentes, que correspondem a um intervalo de possíveis cenários do comportamento futuro das vazões nas sub bacias.

3.2.2 Análise das previsões sazonais de vazão

Por fim, foram realizadas análises visuais e estatísticas das vazões observadas e previstas, de forma a verificar o desempenho da integração do modelo Eta e MGB-IPH com relação a previsibilidade de eventos extremos para a bacia do Rio São Francisco. As análises visuais foram realizadas por meio de comparações gráficas dos hidrogramas observados com os cinco hidrogramas previstos (gerados por cada um dos cinco membros das previsões de precipitação). Já para as análises estatísticas foram considerados os índices de desempenho Erro Médio Relativo (EMR), Erro Médio Absoluto (EMA), coeficiente de correlação linear de Pearson (r), cujas equações e descrições são apresentadas na Tabela 3.5 a seguir, além do gráfico de dispersão das vazões observadas e previstas.

Tabela 3.5 - Índices considerados nas análises de desempenho dos modelos Eta/MGB

ÍNDICE DE DESEMPENHO	DESCRIÇÃO
$EMR = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} * 100$	<p>O Erro Médio Relativo (EMR) mede a diferença média entre as variáveis previstas e observadas, dividida pela média das observações. O índice é dado em porcentagem, podendo apresentar valores positivos ou negativos. Tem-se que quanto mais próximo de 0, menor o erro e, consequentemente, melhor a acurácia do modelo.</p>
$EMA = \sum_{i=1}^n O_i - Q_i $	<p>O Erro Médio Absoluto (EMA) mede a diferença média, em módulo, entre as variáveis previstas e observadas. Com relação às vazões, o valor é dado em m³/s e, assim como no EMR, quanto mais próximo de 0, menor o erro.</p>
$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}) * (O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 * \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}}$	<p>O coeficiente de correlação r representa a relação linear entre as vazões observadas e previstas. Trata-se de um valor adimensional entre -1 e 1, sendo este último considerado uma correlação perfeita e positiva entre as duas variáveis.</p>
<p>Onde: Q_i representa a vazão prevista em m³/s no intervalo de tempo i; O_i representa a vazão observada em m³/s no intervalo de tempo i; n representa o número de dados analisados; \bar{Q} representa o valor médio da vazão prevista; e \bar{O} representa o valor médio da vazão observada.</p>	

Fonte: Wilks (2006); Cruz et al. (2017)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ajuste do modelo hidrológico

O processo de calibração e verificação do modelo hidrológico foi realizado para cada uma das sub-bacias apresentadas anteriormente na Figura 3.8. O período utilizado no processo de calibração foi de aproximadamente uma década, entre os anos de 1990 e 2000, ou seja, antes do período definido para realização das previsões de vazão, que foi realizada para os anos de 2001 a 2018. A definição da década exata para calibração do modelo dependeu de uma análise minuciosa dos dados de vazão observados, com a tentativa de englobar ambos os extremos hidrológicos (eventos de cheia e de seca), a fim de se evitar tendências de superestimação ou subestimação das vazões calculadas. Os valores das funções objetivo NS, NSLog e ΔV para o período de calibração são apresentados na Tabela 4.1 e na Figura 4.2. Já os valores dos parâmetros obtidos para cada sub-bacia podem ser consultados no Apêndice A.

Ainda na Figura 4.2, as sub-bacias que receberam a coloração verde-escuro obtiveram os melhores ajustes e consequentemente os melhores valores para as medidas de desempenho, seguido das regiões de coloração verde claro e amarelo. Já as regiões em vermelho foram as que apresentaram o pior desempenho em relação à calibração do MGB-IPH. Pode-se observar que as regiões do Alto e Médio São Francisco apresentaram um melhor desempenho em comparação às demais regiões, o que pode ser explicado pelo fato de se tratar das regiões onde a maior parcela das vazões é gerada, o que facilita o processo de calibração.

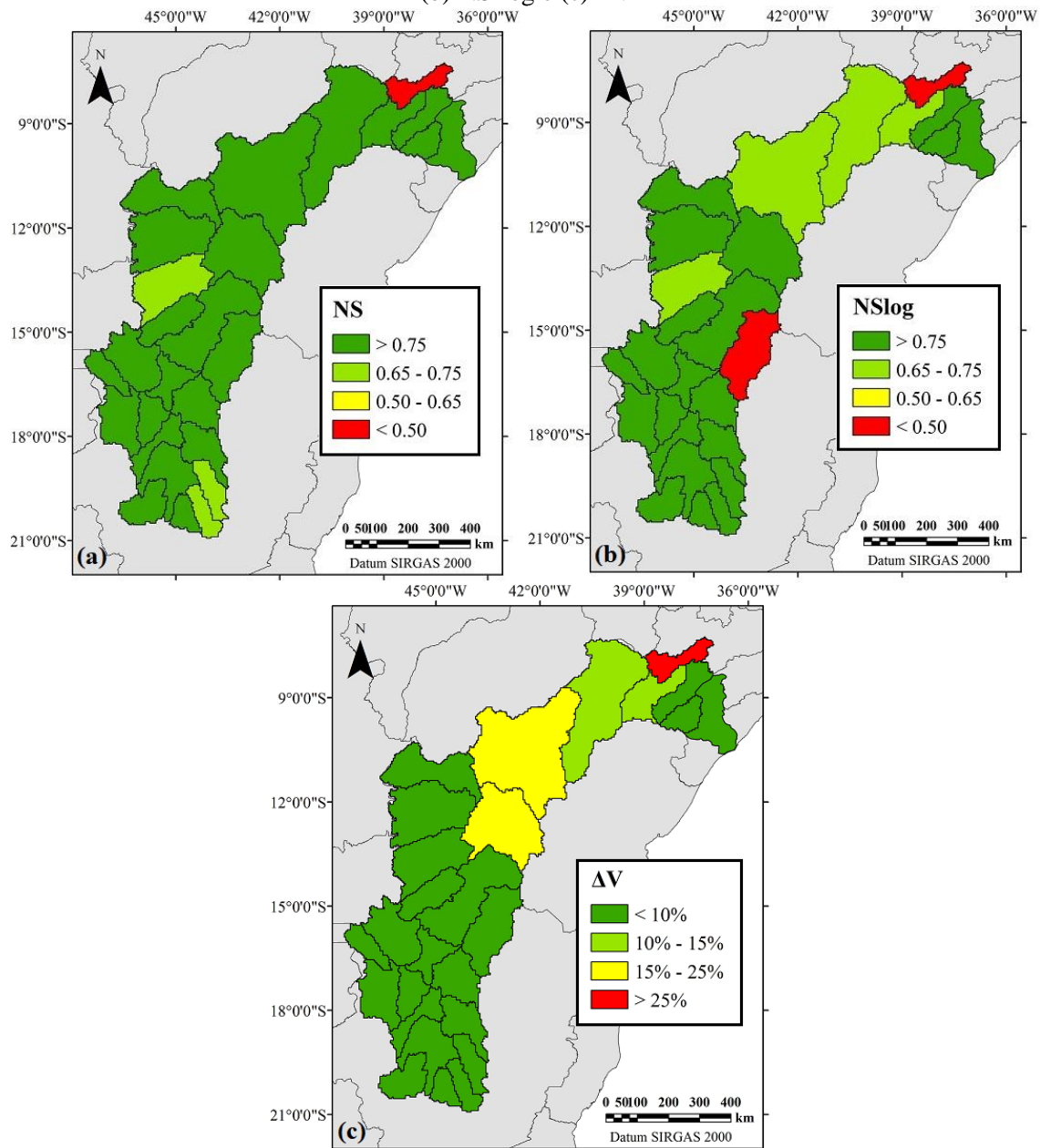
É importante atentar para a questão da sub-bacia Floresta, que apresentou os piores valores para todas as funções objetivo calculadas, provavelmente devido aos baixos valores de vazão que dificultam o ajuste do modelo hidrológico, sendo esses apresentados na Figura 4.3. Entretanto, trata-se de uma região que não contribui significativamente para o sistema hidrológico do rio São Francisco e, portanto, não teve um peso tão grande na decisão final em relação a determinação dos parâmetros. Logo, foi adotado o conjunto de parâmetros mais representativo para as bacias estratégicas do São Francisco, cujo conhecimento do regime de vazões é imprescindível para a gestão dos recursos hídricos, como no caso das sub bacias das Usinas Hidrelétricas (UHE) de Três Marias e Sobradinho. Além disso, essas duas sub bacias estão localizadas em diferentes regiões fisiográficas do Brasil (Três Marias no Sudeste e Sobradinho no Nordeste), o que permite uma melhor análise da capacidade dos modelos em

antecipar eventos com escala sazonal de acordo com a variabilidade espacial dos dados produzidos.

Tabela 4.1 – Valores das funções objetivo obtidos na calibração do MGB-IPH para a bacia do São Francisco no período de 01/01/1990 a 31/12/2000

SUB-BACIA	POSTO FLUVIOMÉTRICO	REGIÃO FISIOGRÁFICA	NS	NSLog	ΔV (%)
1	Porto das Andorinhas	Alto	0.862	0.955	2.312
2	Velho da Taipa	Alto	0.847	0.795	9.365
3	Ponte da Taquara	Alto	0.740	0.802	-1.631
4	UHE Três Marias	Alto	0.898	0.861	5.152
5	Pirapora-Barreiro	Alto	0.941	0.911	-0.001
6	Ponte do Licínio - Jusante	Alto	0.739	0.833	3.916
7	Várzea da Palma	Alto	0.847	0.907	0.656
8	Cachoeira da Manteiga	Alto	0.918	0.927	-0.430
9	Porto dos Poções	Alto	0.787	0.809	-0.932
10	Porto da Extrema	Alto	0.921	0.868	3.668
11	Porto Alegre	Alto	0.898	0.882	3.509
12	Santo Inácio	Alto	0.772	0.800	0.281
13	São Francisco	Alto	0.960	0.937	5.225
14	Boca da Caatinga/Gado Bravo	Alto	0.916	0.351	0.853
15	Juvenília	Alto	0.876	0.860	0.197
16	Bom Jesus da Lapa	Alto	0.912	0.916	9.671
17	Porto Novo	Médio	0.715	0.703	0.129
18	Morpará	Médio	0.905	0.851	15.581
19	Fazenda Macambira	Médio	0.845	0.860	0.292
20	Boqueirão	Médio	0.791	0.779	-7.505
21	UHE Sobradinho	Médio	0.869	0.658	15.785
22	Ibó	Sub médio	0.899	0.741	11.677
23	Floresta	Sub médio	0.111	-0.973	-56.352
24	UHE Itaparica/Luiz Gonzaga	Sub médio	0.885	0.697	13.161
25	UHE Paulo Afonso/Moxotó	Sub médio	0.899	0.766	0.979
26	Pão de Açúcar	Baixo	0.995	0.980	-0.867
27	Foz	Baixo	0.974	0.925	1.710

Figura 4.1 – Valores obtidos para cada função objetivo após calibração do MGB-IPH, sendo (a) NS, (b) NSLog e (c) ΔV



O comportamento dos hidrogramas para as UHE de Três Marias e Sobradinho são apresentados nas Figuras 4.4 e 4.5, respectivamente. No entanto, para a sub bacia de Sobradinho é observada uma superestimação constante das vazões simuladas, que para o período analisado foi de aproximadamente 600 m³/s. Dessa forma, ao ajustar as simulações diminuindo esse valor fixo de todas as vazões, nota-se que elas se aproximam mais do valor observado (Figura 4.5). Uma possível explicação seria um erro na equação do cálculo das vazões do reservatório (uma vez que as vazões para este ditas observadas são na verdade calculadas e disponibilizadas pela ANA), como na de evapotranspiração, por exemplo.

Figura 4.2 – Hidrogramas observado e calculado para a sub bacia Floresta após calibração do modelo hidrológico

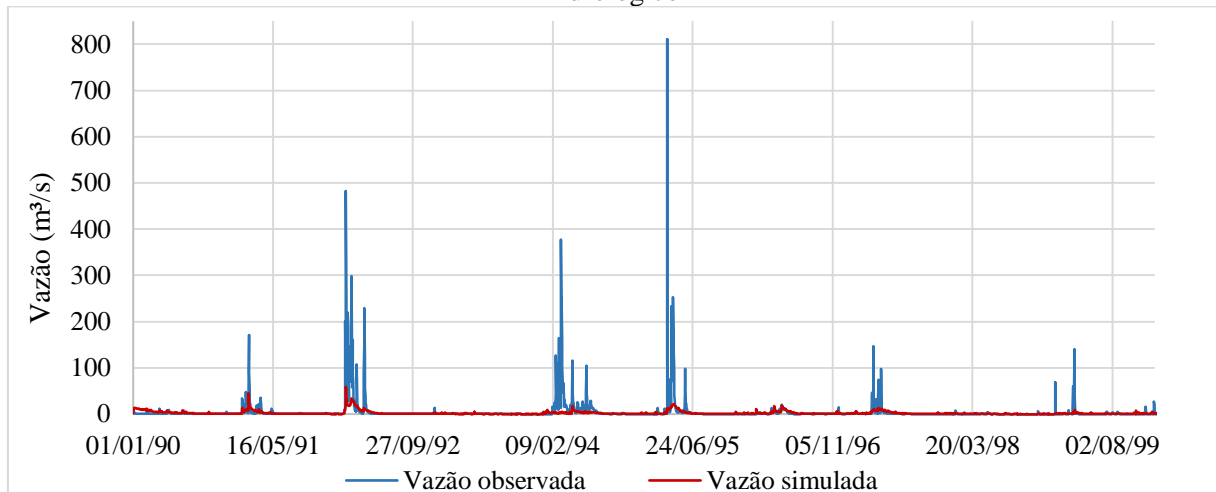


Figura 4.3 – Hidrogramas observado e simulado para a sub bacia da UHE de Três Marias após calibração do modelo hidrológico

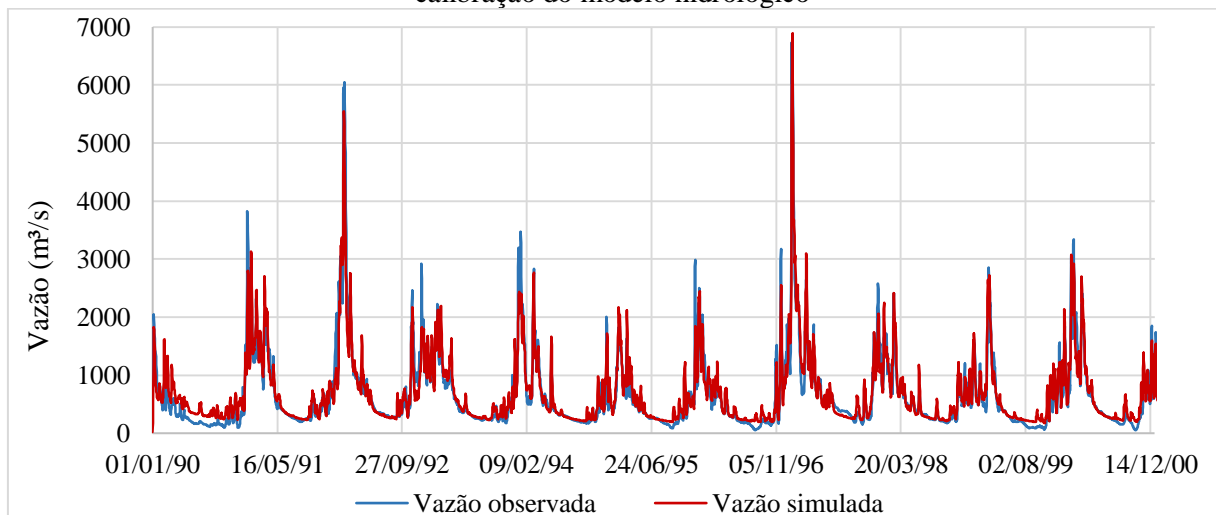
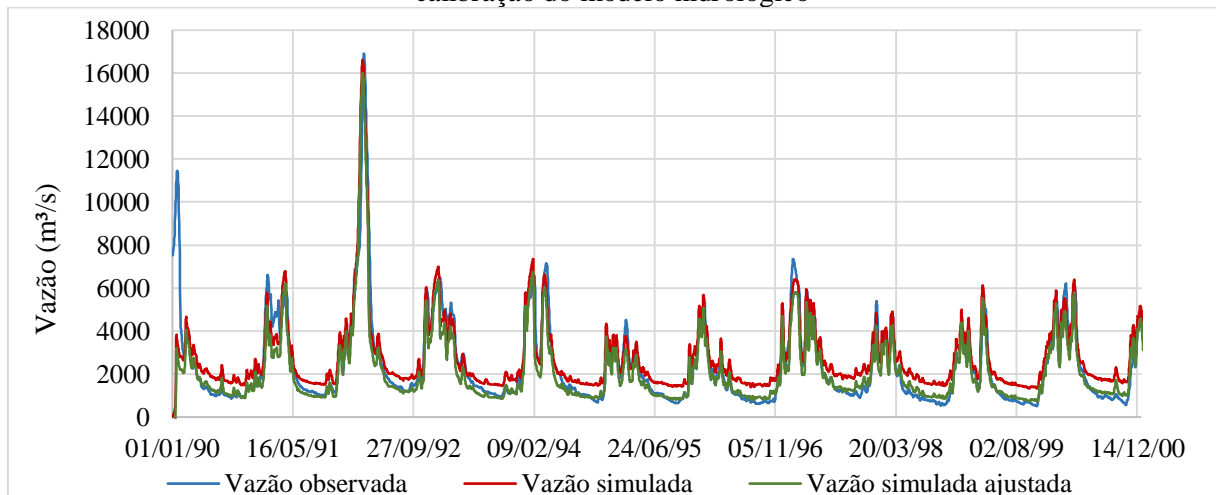


Figura 4.4 – Hidrogramas observado e simulado para a sub bacia da UHE de Sobradinho após calibração do modelo hidrológico

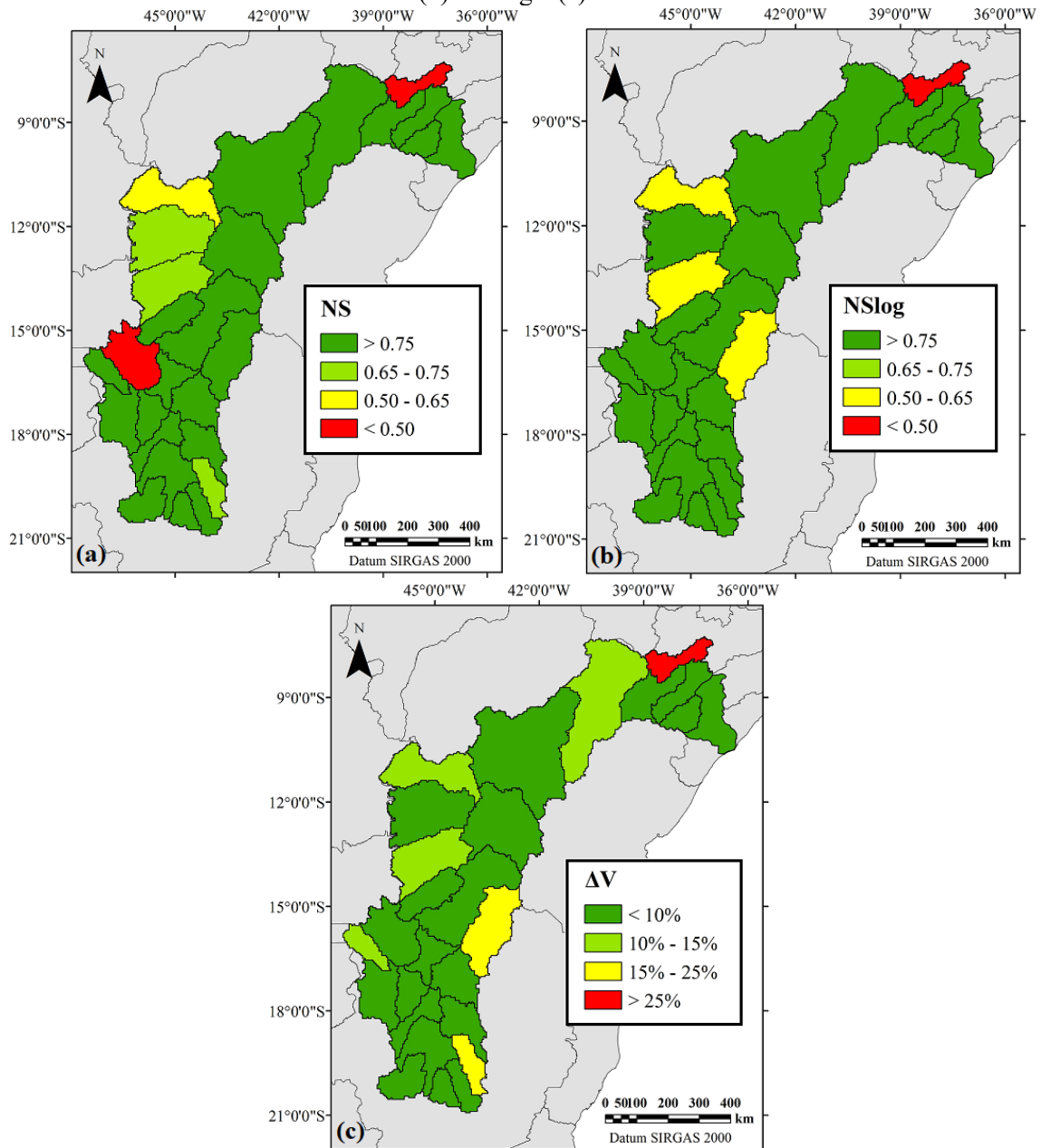


Uma vez selecionados os parâmetros para a bacia do São Francisco, foram realizadas novas simulações de vazão para todas as sub bacias, dessa vez para o período entre 1980 e 1989, com o objetivo de verificar se o modelo foi bem ajustado para a bacia. As análises das vazões simuladas e observadas foram realizadas por meio das mesmas medidas de desempenho utilizadas para avaliar as simulações do processo de calibração. Os valores das funções objetivo NS, NSLog e ΔV para o período de verificação são apresentados na Tabela 4.2 e na Figura 4.6.

Tabela 4.2 – Valores das funções objetivo obtidos na verificação do MGB-IPH para a bacia do São Francisco no período de 01/01/1980 a 31/12/1989

SUB-BACIA	POSTO FLUVIOMÉTRICO	REGIÃO FISIOGRÁFICA	NS	NSLog	ΔV (%)
1	Porto das Andorinhas	Alto	0.877	0.921	-8.680
2	Velho da Taipa	Alto	0.870	0.874	-2.996
3	Ponte da Taquara	Alto	0.837	0.890	0.231
4	UHE Três Marias	Alto	0.894	0.883	-3.393
5	Pirapora-Barreiro	Alto	0.950	0.958	2.474
6	Ponte do Licínio - Jusante	Alto	0.677	0.807	16.709
7	Várzea da Palma	Alto	0.836	0.902	7.200
8	Cachoeira da Manteiga	Alto	0.942	0.960	5.734
9	Porto dos Poções	Alto	0.812	0.798	-10.850
10	Porto da Extrema	Alto	0.916	0.928	-4.433
11	Porto Alegre	Alto	0.918	0.932	-3.059
12	Santo Inácio	Alto	-0.047	0.807	-8.544
13	São Francisco	Alto	0.950	0.961	1.957
14	Boca da Caatinga/Gado Bravo	Alto	0.822	0.530	-20.958
15	Juvenília	Alto	0.867	0.863	-6.489
16	Bom Jesus da Lapa	Alto	0.925	0.952	2.490
17	Porto Novo	Médio	0.665	0.556	-11.131
18	Morpará	Médio	0.906	0.927	6.337
19	Fazenda Macambira	Médio	0.725	0.747	-8.386
20	Boqueirão	Médio	0.562	0.523	-10.455
21	UHE Sobradinho	Médio	0.880	0.834	5.808
22	Ibó	Sub médio	0.926	0.878	10.094
23	Floresta	Sub médio	0.089	0.212	-77.672
24	UHE Itaparica/Luiz Gonzaga	Sub médio	0.931	0.891	6.492
25	UHE Paulo Afonso Moxotó	Sub médio	0.932	0.890	6.568
26	Pão de Açúcar	Baixo	0.996	0.992	-0.863
27	Foz	Baixo	0.971	0.949	1.967

Figura 4.5 – Valores obtidos para cada função objetivo após verificação do MGB-IPH, sendo (a) NS, (b) NSLog e (c) ΔV



Pode-se observar, de acordo com a Figura 4.6, que as regiões do Alto e Médio São Francisco apresentaram novamente um melhor desempenho em comparação às demais regiões, embora a maioria das sub bacias tenha apresentado valores satisfatórios para todas as funções objetivo. Nas Figuras 4.7 e 4.8 são apresentadas as vazões observadas e simuladas para as sub bacias da UHE de Três Marias e Sobradinho, respectivamente, para o novo período analisado, em que se pode constatar que estas obtiveram valores muito próximos entre ambas as vazões. No caso de Sobradinho foi subtraído o valor constante de 500 m³/s de todas as vazões simuladas, e as novas vazões calculadas são também apresentadas na Figura 4.8.

Concluiu-se, portanto, que a calibração e verificação do modelo hidrológico MGB-IPH para a bacia do São Francisco foi eficiente, uma vez que o modelo conseguiu representar com excelência o comportamento hidrológico de quase todas as sub bacias para ambos os períodos de tempo analisados.

Figura 4.6 – Hidrogramas observado e simulado para a sub bacia da UHE de Três Marias após verificação do modelo hidrológico

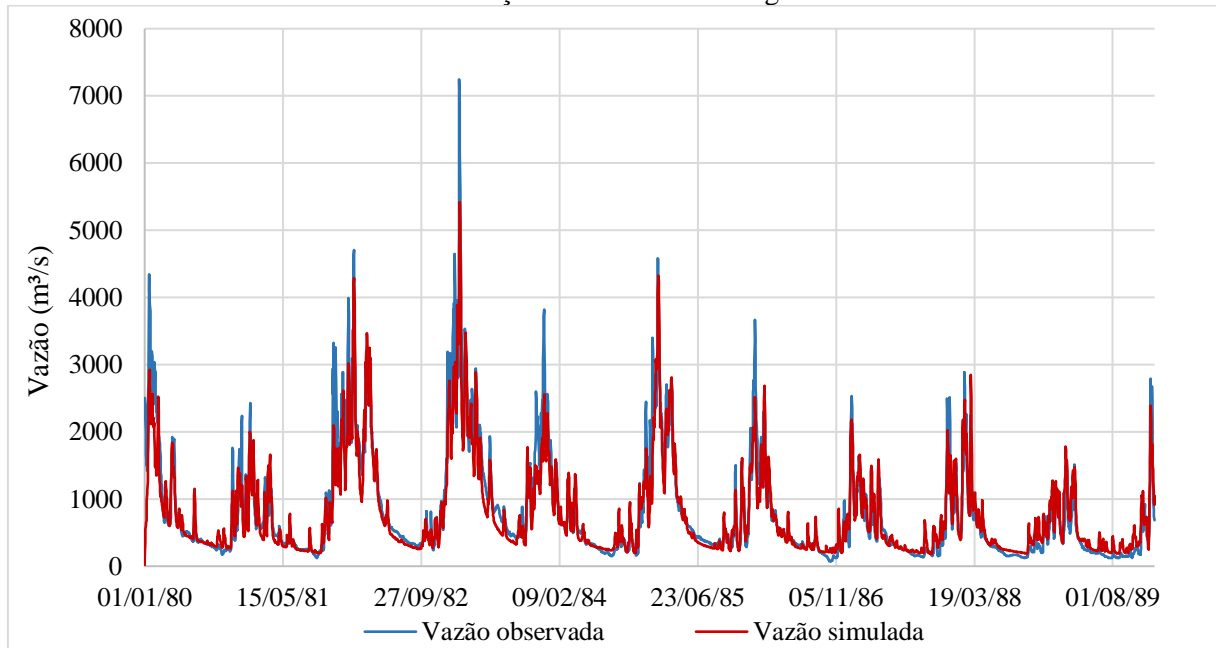
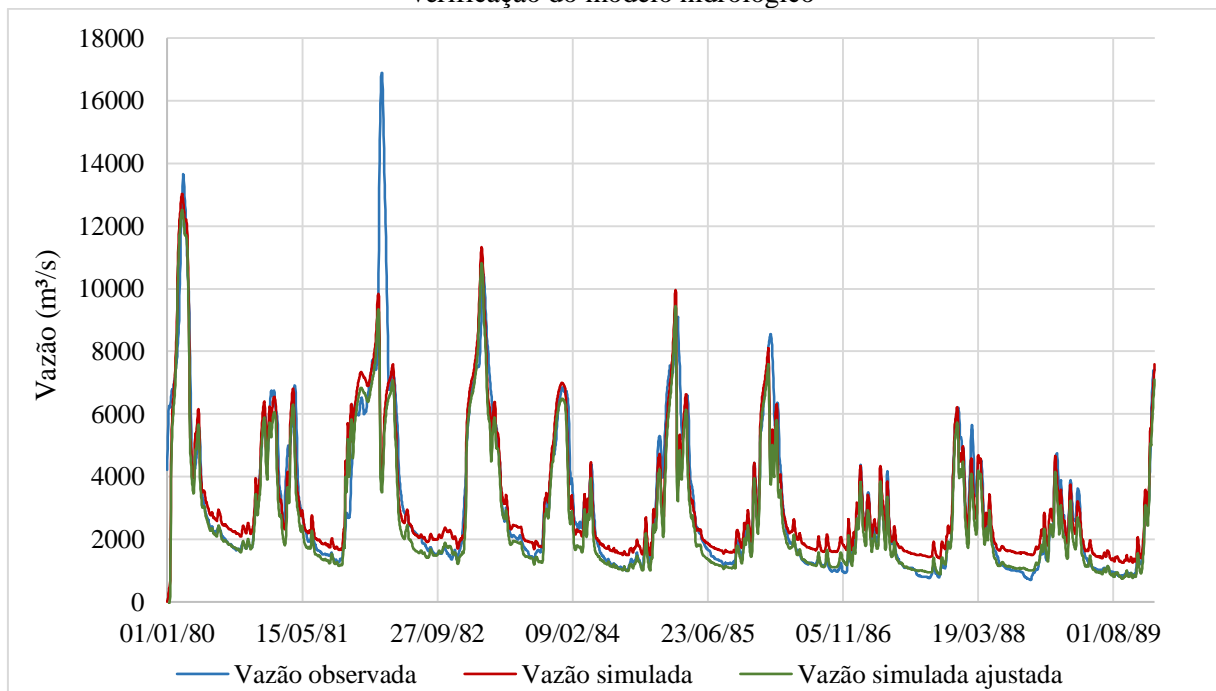


Figura 4.7 – Hidrogramas observado e simulado para a sub bacia da UHE de Três Marias após verificação do modelo hidrológico



4.2 Previsão hidrológica na bacia do São Francisco

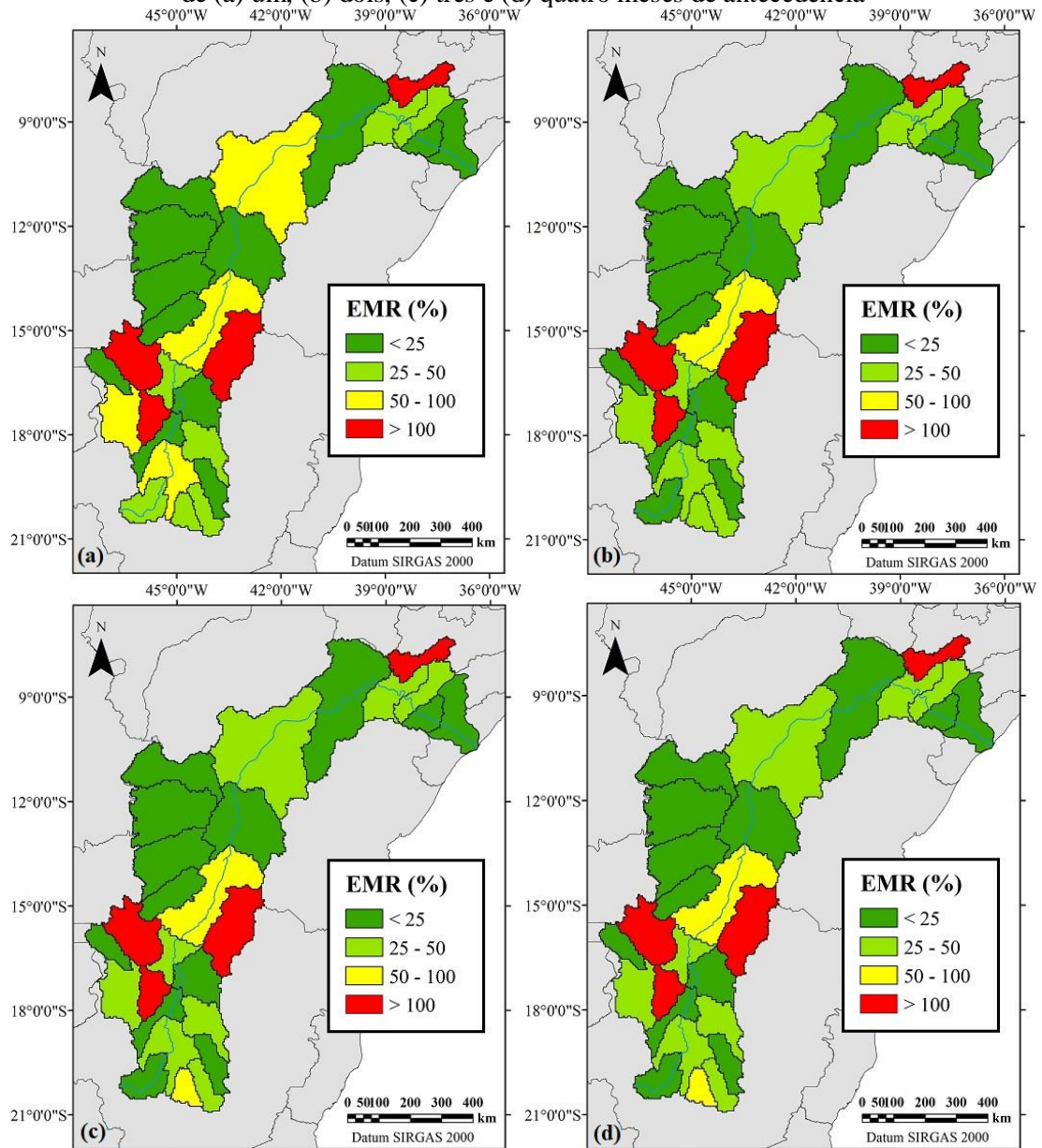
4.2.1 Análise da previsibilidade sazonal de vazões

As previsões de precipitação do modelo regional Eta foram interpoladas para a grade do MGB-IPH para serem utilizadas como dado de entrada no modelo na geração de previsões sazonais de vazão com até quatro meses de antecedência. Como se tratam de previsões por conjunto, foram utilizados cinco membros e, dessa forma, as previsões foram iniciadas sempre entre os dias 13 e 17 de cada mês, estendendo-se pelos quatro meses seguintes em intervalos de tempo diários. Para a realização das previsões de vazão no período de novembro de 2013, por exemplo, o modelo hidrológico utilizou as chuvas previstas pelo Eta a partir do dia 13 de julho até o dia 13 de outubro de 2013, com horizontes de previsão de quatro a um mês de antecedência, respectivamente. Esse procedimento foi então repetido para cada um dos demais membros do conjunto de previsões (dias 14, 15, 16 e 17), resultando em cinco diferentes hidrogramas para cada mês analisado. De forma a facilitar a análise comparativa do desempenho dos modelos Eta e MGB-IPH com os dados observados de vazão, obtidos dos postos fluviométricos da ANA, as previsões de vazão diárias foram transformadas em médias mensais.

No Apêndice B estão disponíveis as vazões obtidas para todas as sub bacias, referentes a todo o período de previsão adotado (começando em janeiro de 2001 e terminando em dezembro de 2018) e para cada um dos horizontes de previsão: um, dois, três e quatro meses de antecedência. Já os resultados das análises estatísticas utilizando os índices de desempenho EMR, EMA e o coeficiente de correlação r são apresentados, respectivamente, nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11, com destaque para o curso d'água principal da bacia, o rio São Francisco.

Em termos de EMR, é possível observar que, para antecedências maiores (horizonte de três e quatro meses), os resultados foram mais satisfatórios do que para a antecedência de um mês, sendo os piores valores (erros maiores que 100%) obtidos para as sub bacias: Porto Alegre, Santo Inácio, Boca da Caatinga e Floresta. Com relação às duas primeiras sub bacias, essas apresentam muitas inconsistências no banco de dados fluviométrico, com falha de medições principalmente nos períodos de inverno, em que as vazões são mais baixas (Figuras 4.12 e 4.13, respectivamente). Dessa forma, como os erros mais baixos, referentes ao período de estiagem, não foram contabilizados no cálculo final do EMR, este sofreu mais influência dos maiores valores de erro relativo, referentes ao período de verão, onde as vazões são mais altas.

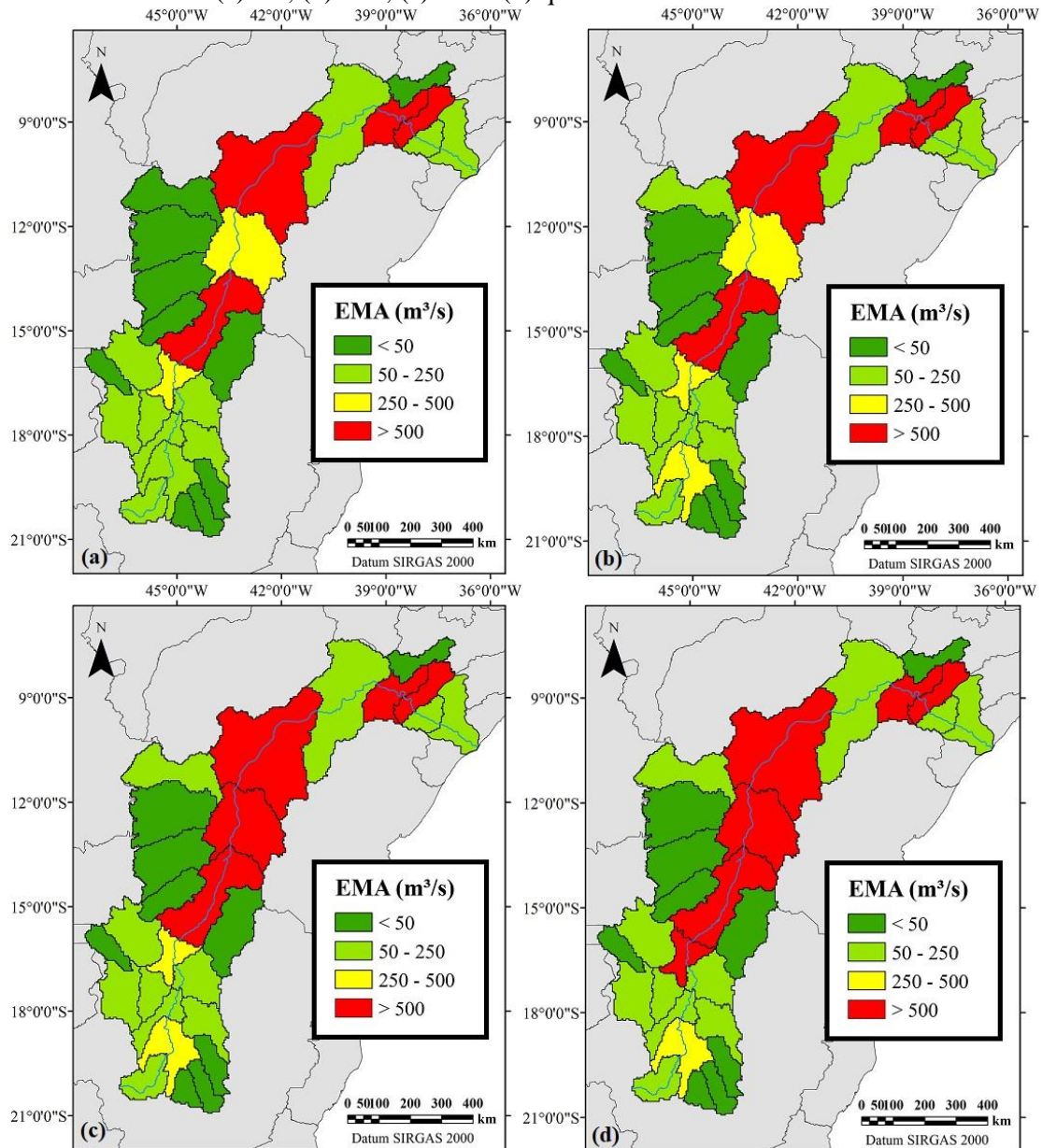
Figura 4.8 – Resultados do índice EMR para toda a bacia do São Francisco considerando os horizontes de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses de antecedência



Quanto à sub bacia Boca da Caatinga (Figura 4.14), trata-se de uma região cujos valores de vazão são extremamente baixos no período de estiagem, com quase seca dos rios no inverno, seguido de picos de cheia acentuados nos meses do verão. Essa sensibilidade às variações de vazão, somada aos baixos volumes de água característicos da bacia, dificultaram a previsão pelos modelos em todos os horizontes, que foi consideravelmente subestimada para praticamente todos os verões do período analisado, resultando em valores altos de EMR. Isso pode ser confirmado quando comparamos com os valores obtidos para o oeste do Estado da Bahia, como as sub bacias Porto Novo, Fazenda Macambira e Boqueirão (Figura 4.15). Trata-se de uma região cujos cursos d'água são perenes, ou seja, possuem fluxo de água durante todo

o ano, apesar dos valores também baixos de vazão. Logo, ao contrário do que acontece na Boca da Caatinga, a ausência de picos elevados e de secas no período da estiagem facilitam a previsibilidade de vazões sazonais pelos modelos utilizados.

Figura 4.9 – Resultados do índice EMA para toda a bacia do São Francisco considerando os horizontes de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses de antecedência



Já no caso da sub bacia Floresta, esta já havia apresentado um péssimo ajuste com valores insatisfatórios para todas as funções objetivo analisadas na calibração e verificação do modelo, o que refletiu no cálculo de todos os índices de desempenho analisados.

Uma outra observação interessante é em relação aos valores baixos de EMR nas bacias de cabeceira, localizadas na região do Alto São Francisco. Esse indicativo de acurácia do

modelo, principalmente para as sub bacias Porto das Andorinhas, Velho da Taipa e Ponte da Taquara, é extremamente relevante, uma vez que são as afluentes da UHE Três Marias, um dos maiores pontos de interesse com relação à gestão hídrica da bacia do São Francisco. É importante ressaltar, entretanto, que valores baixos ou nulos de EMR não significam necessariamente que a previsão foi perfeita, pois também podem indicar que os valores positivos e negativos desse parâmetro acabaram se compensando nos resultados (WILKS, 2006).

Figura 4.10 – Resultados do coeficiente de correlação linear para toda a bacia do São Francisco considerando os horizontes de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses de antecedência

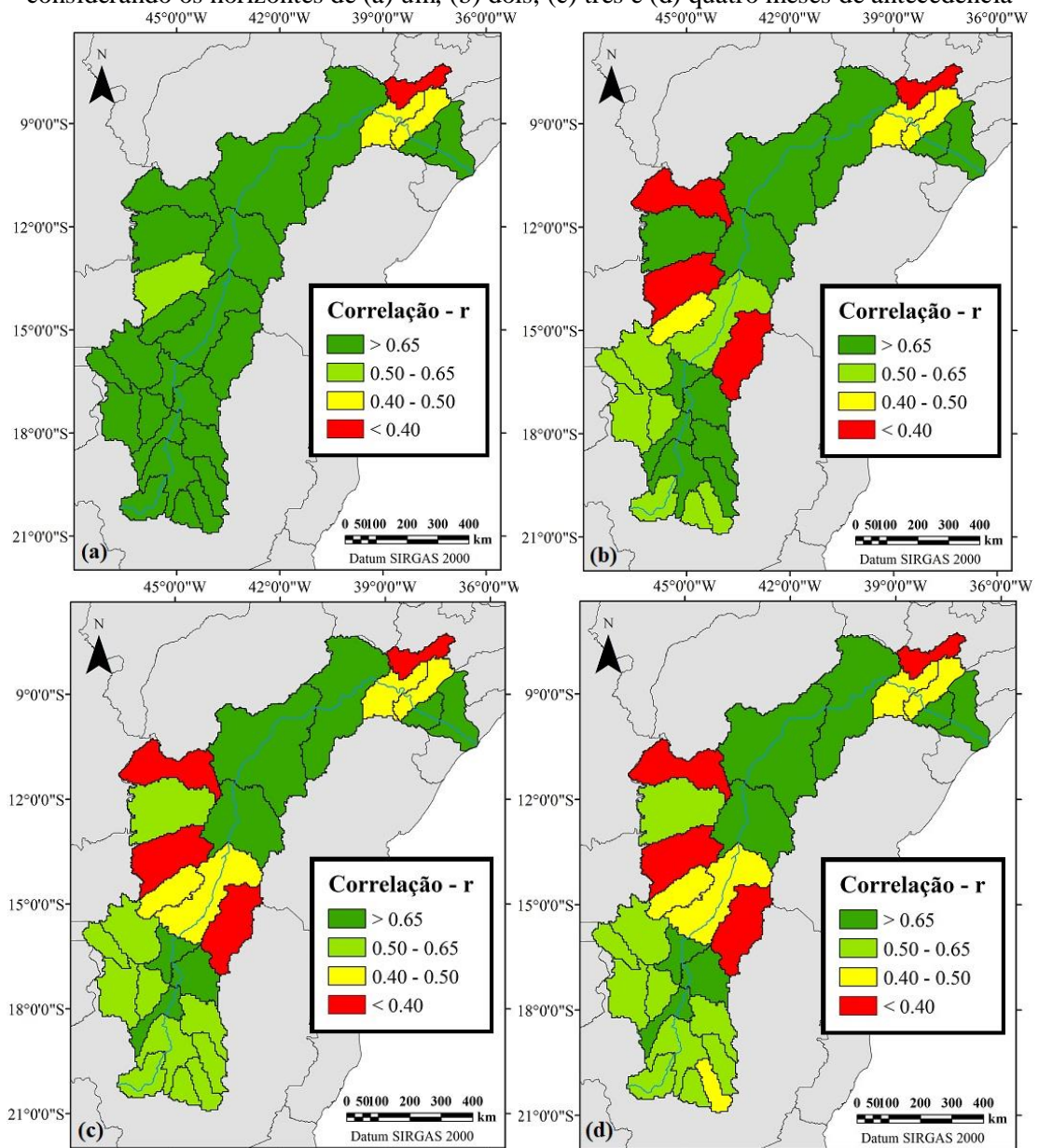


Figura 4.11 – Vazões observadas e previstas para a sub bacia Porto Alegre, no período de 01/01/2001 a 31/12/2018, com antecedência de um mês

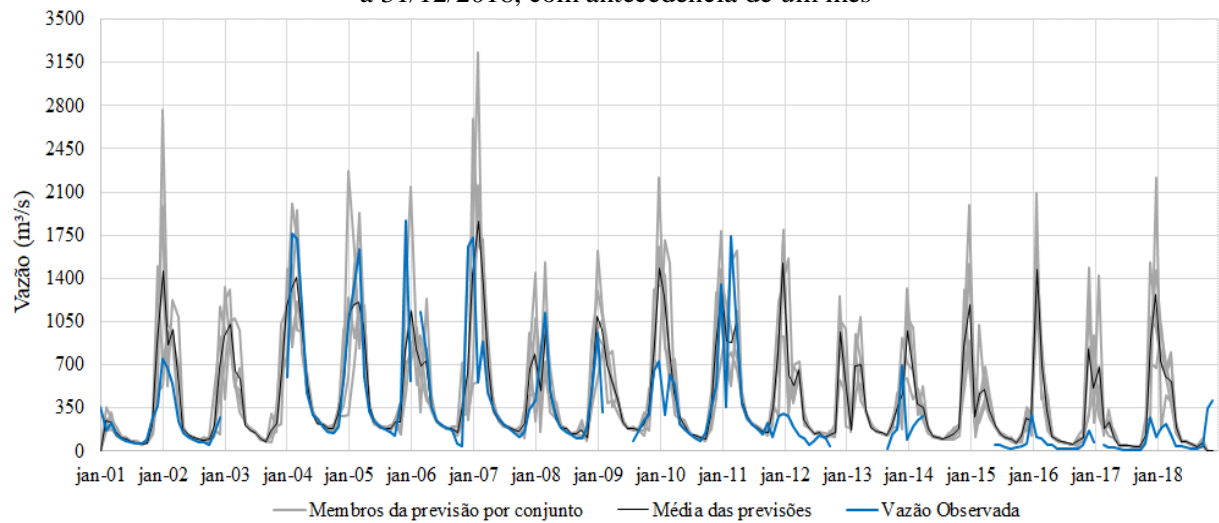


Figura 4.12 – Vazões observadas e previstas para a sub bacia Santo Inácio, no período de 01/01/2001 a 31/12/2018, com antecedência de um mês

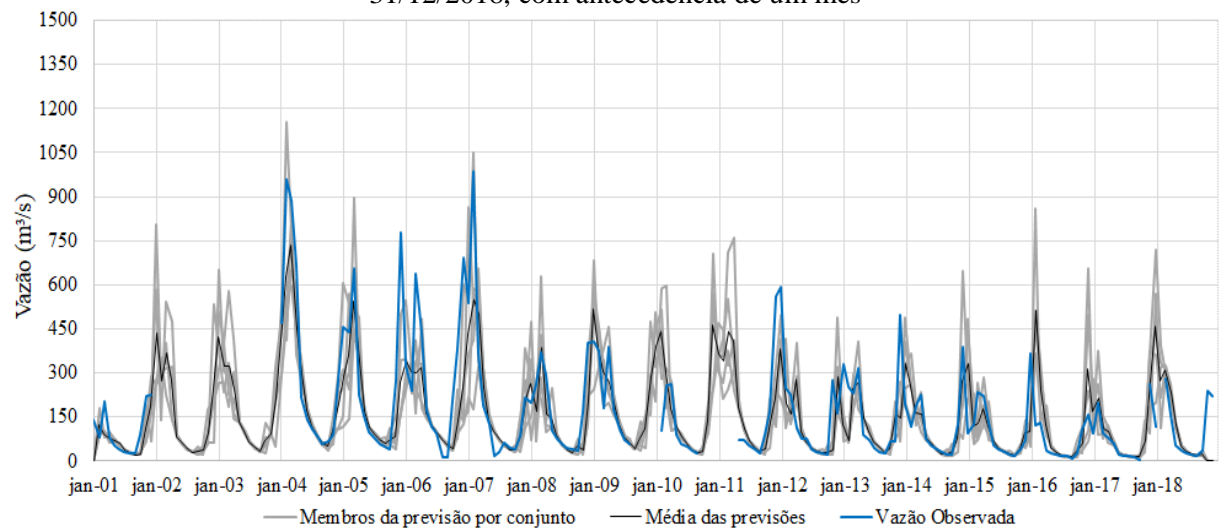


Figura 4.13 – Vazões observadas e previstas para a sub bacia Boca da Caatinga, no período de 01/01/2001 a 31/12/2018, com antecedência de um mês

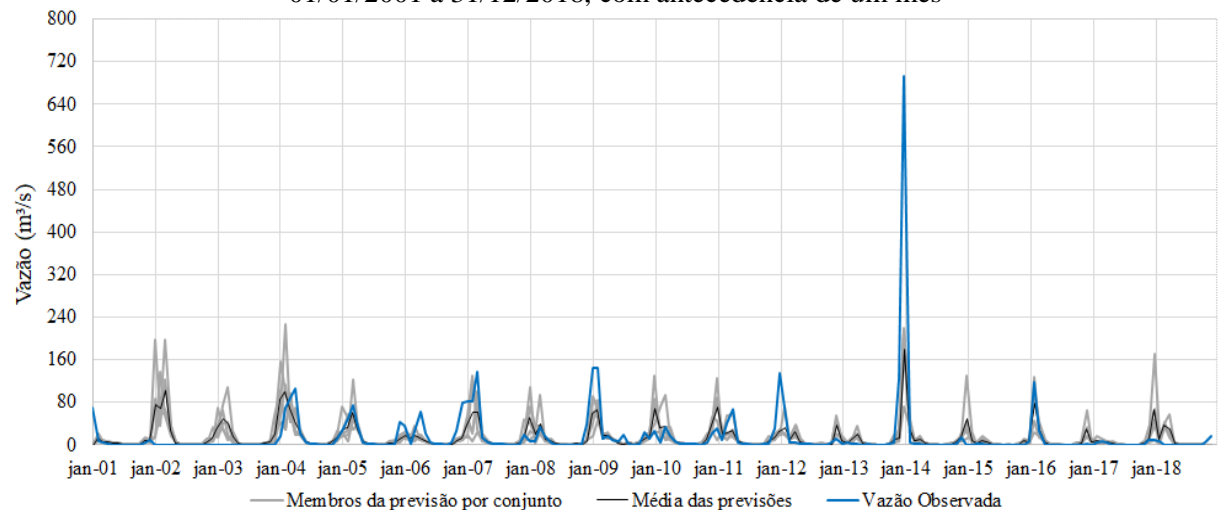
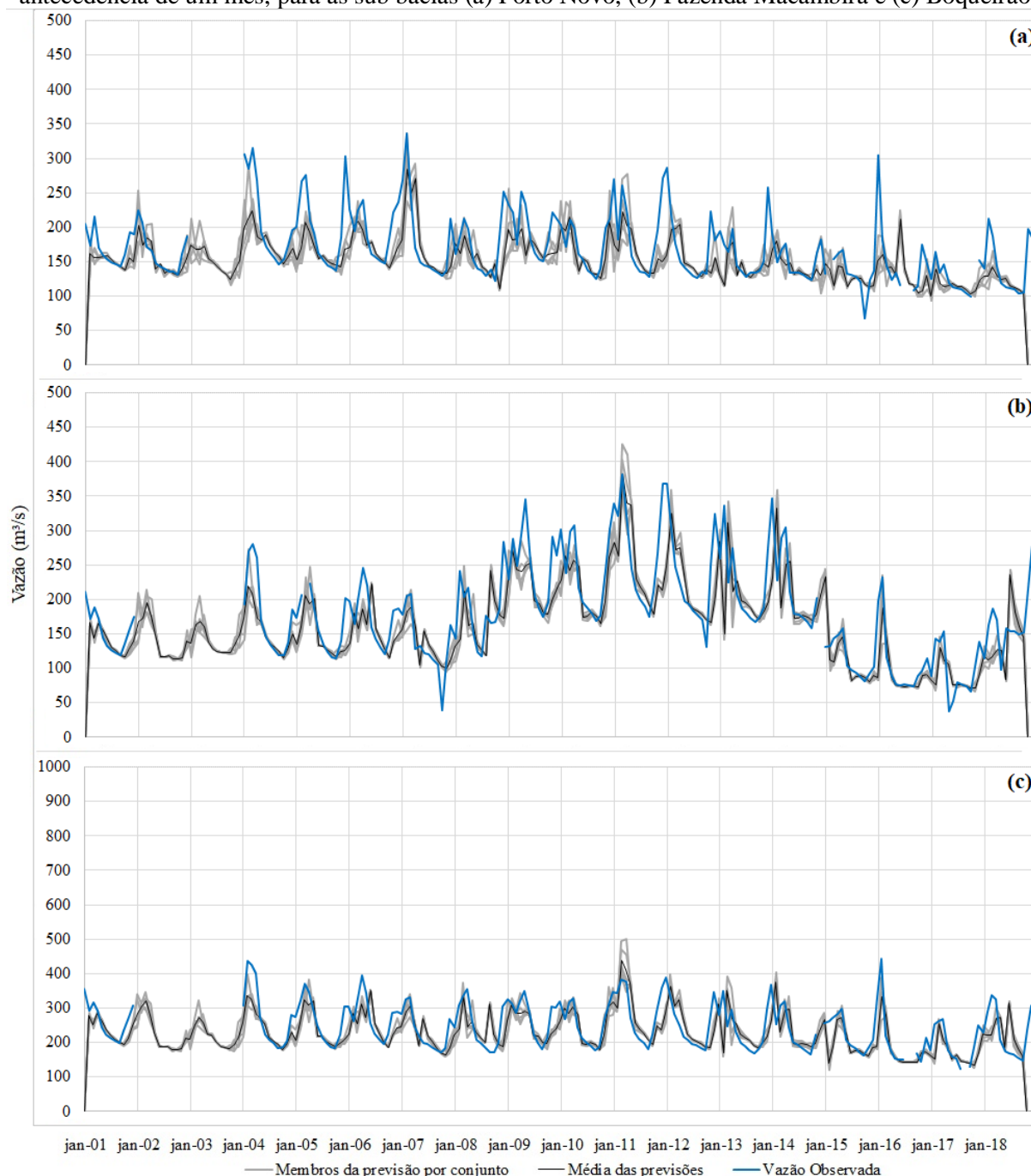


Figura 4.14 – Vazões observadas e previstas, no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 e com antecedência de um mês, para as sub bacias (a) Porto Novo, (b) Fazenda Macambira e (c) Boqueirão



Por outro lado, tem-se os valores de EMA que são apresentados em módulo, ou seja, possuem sempre valores positivos e absolutos correspondentes às diferenças entre as vazões observadas e previstas. Nota-se, na Figura 4.10, que os piores resultados para esse índice foram obtidos para as sub bacias localizadas ao longo do rio São Francisco, principalmente nas afluentes da UHE de Sobradinho. Esse comportamento, no entanto, já era esperado, uma vez que essas sub bacias apresentam os maiores valores de vazão por possuírem como curso d'água

principal o São Francisco, logo as diferenças de vazão seriam também maiores. Dessa forma, para este estudo, o índice EMA não foi considerado um bom parâmetro para medir o desempenho dos modelos Eta/MGB, sendo desconsiderado nas conclusões acerca da qualidade das previsões.

Quanto ao coeficiente de correlação linear r , os melhores resultados foram obtidos para a antecedência de um mês, com uma considerável piora no índice a medida o horizonte de previsão aumenta, principalmente se analisarmos as sub bacias Boca da Caatinga, Porto Novo, Boqueirão e Floresta. Novamente, tratam-se das sub bacias com os menores valores de vazão e, assim como no cálculo do EMR, isso dificultou a previsão pelos modelos em todos os horizontes. É importante salientar também que valores baixos (embora positivos) de correlação entre dados previstos e observados para o São Francisco já haviam sido apontados por Chou, Bustamante e Gomes (2005) com relação a previsões sazonais de precipitação, principalmente nos meses de transição do período seco ao úmido, onde há maior variabilidade climática. Pode-se, portanto, considerar que parte dos erros das previsões de vazão podem ter tido origem nas previsões sazonais do modelo atmosférico, que neste caso não foram compensadas pelo modelo hidrológico.

Logo, com exceção de alguns problemas pontuais tratados acima, foi considerado que as previsões de vazão para o rio São Francisco apresentaram uma boa acurácia, principalmente em relação às sub bacias localizadas no Alto e no Baixo São Francisco, que apresentaram bons resultados para todos os índices de desempenho analisados.

Ademais, devido a importância do conhecimento do regime de vazões das sub bacias das usinas hidrelétricas de Três Marias e Sobradinho, estas serão analisadas com mais detalhes nos itens a seguir, com destaque para o comportamento das vazões previstas e observadas no período da crise hídrica mencionada anteriormente (verões de 2014 e 2015).

4.2.2 Resultados em Três Marias

As vazões observadas e previstas para a sub bacia de Três Marias, no período de janeiro de 2001 a dezembro de 2018, são apresentadas a seguir nas Figuras 4.16 e 4.17. É possível observar que para todo o período analisado e para todas as antecedências, o modelo tendeu a superestimar os maiores picos, com exceção dos verões de 2006-2007, 2007-2008 e 2008-2009, enquanto previu de forma satisfatória os meses de estiagem. Entretanto, esse último comportamento já era esperado devido a quantidade reduzida de chuvas na bacia nesse período.

Figura 4.15 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Três Marias no período de 01/01/2001 a 31/07/2012 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

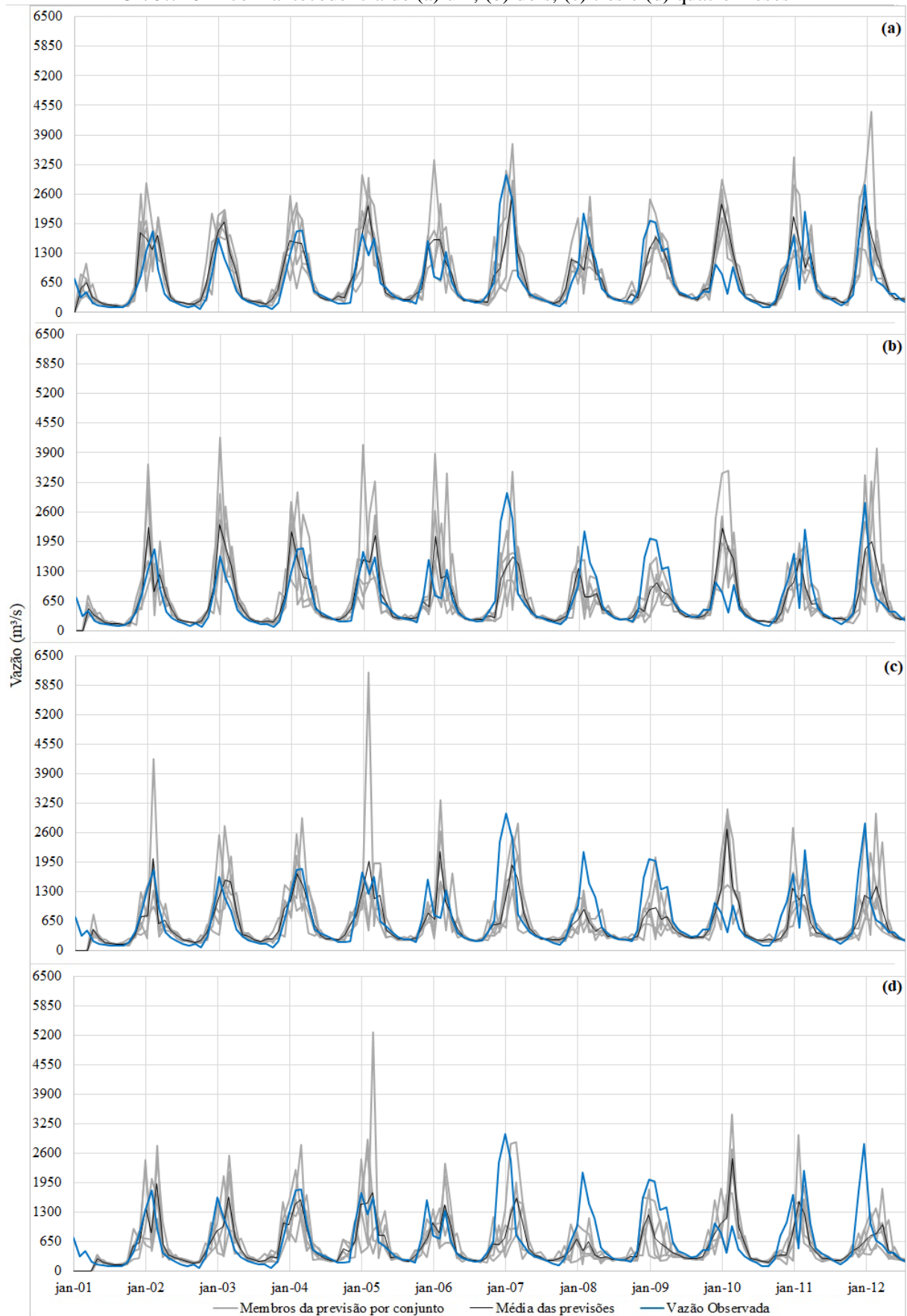
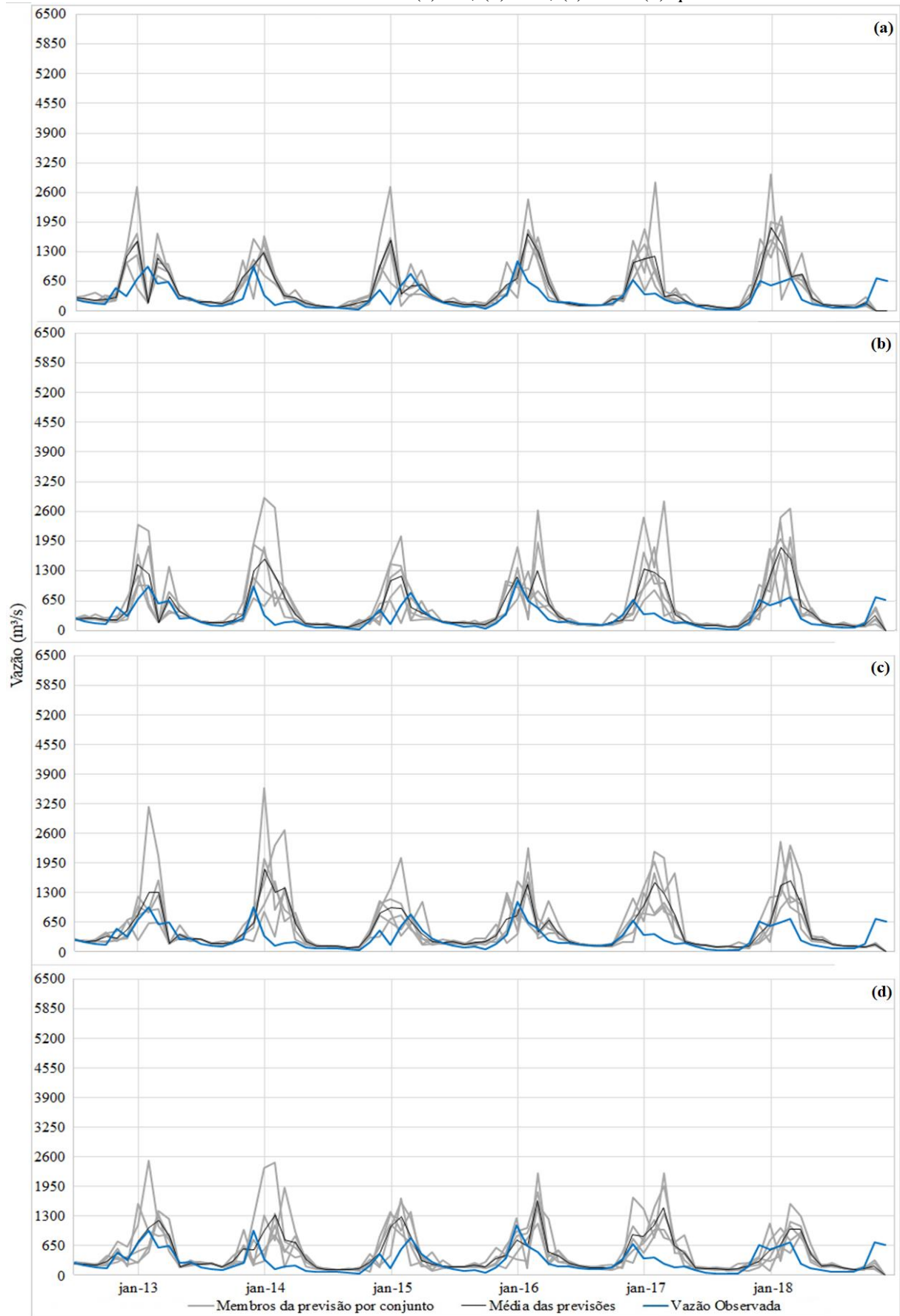
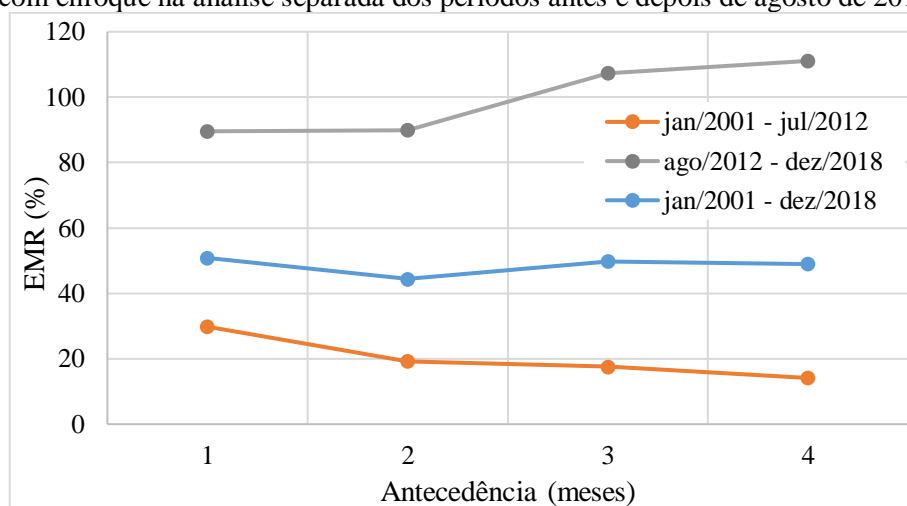


Figura 4.16 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Três Marias no período de 01/08/2012 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses



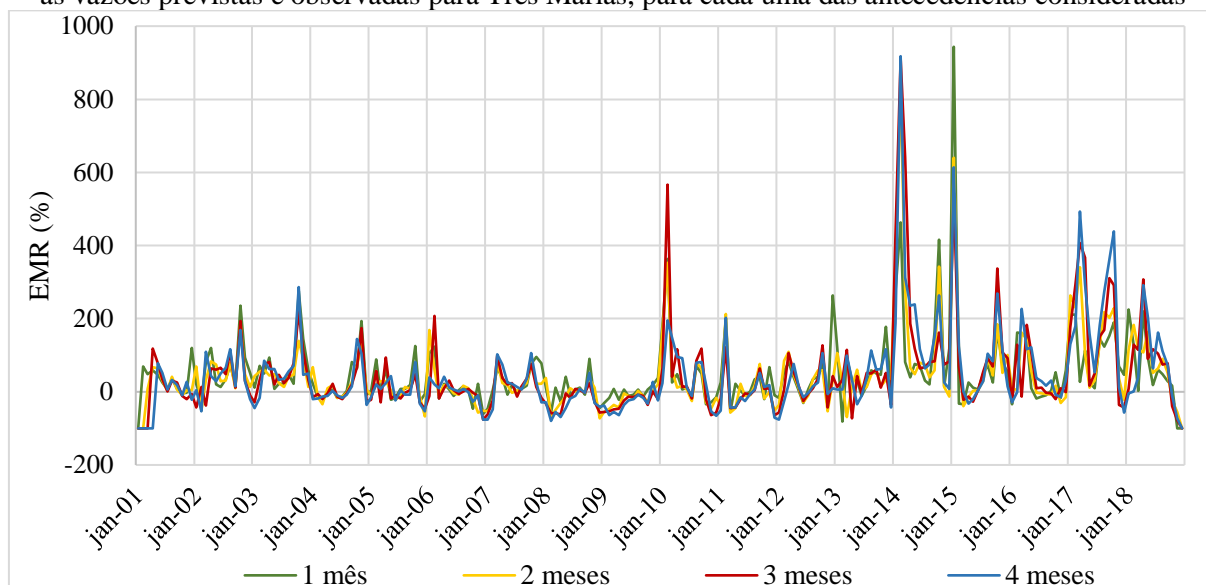
Ainda em relação aos hidrogramas das Figuras 4.16 e 4.17 nota-se que, nos verões dos anos que sucedem 2012 houve uma piora das previsões para o período úmido, que contaram também com o atraso de alguns picos de vazão. Esse comportamento se torna mais evidente ao analisar a tendência dos erros relativos das médias mensais para todo o período, conforme demonstrado na Figura 4.18. É possível concluir, portanto, que os valores altos de EMR para todo o período (2001 a 2018) foram influenciados pela baixa previsibilidade dos modelos a partir do ano de 2012, apresentando erros superiores a 100% para as antecedências de três e quatro meses. Já para o período de 2001 a 2012, o desempenho dos modelos Eta/MGB foi consideravelmente melhor, sendo o maior EMR obtido para o horizonte de um mês, com o valor de aproximadamente 30%.

Figura 4.17 - Valores de EMR obtidos para Três Marias para as quatro antecedências consideradas, com enfoque na análise separada dos períodos antes e depois de agosto de 2012



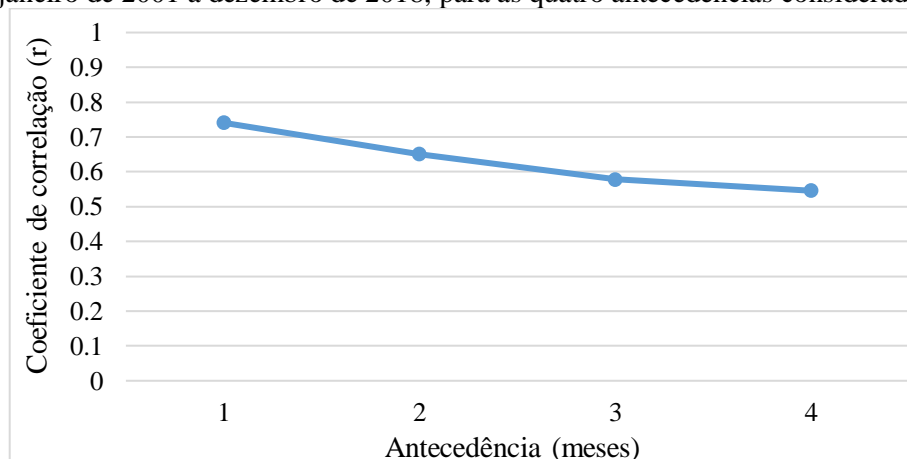
Além disso, é possível observar, na Figura 4.19, que os maiores valores obtidos de EMR foram justamente para os verões de 2014 e 2015, com erros superiores a 900%, inferindo que os modelos Eta/MGB não foram eficientes principalmente na representação do extremo hidrológico ocorrido particularmente nesses anos.

Figura 4.18 – Erros médios obtidos para cada mês entre os anos de 2001 a 2018, quando comparadas as vazões previstas e observadas para Três Marias, para cada uma das antecedências consideradas



Com relação às antecedências, os erros médios foram consideravelmente semelhantes, demonstrando não haver muita diferença entre os valores de vazão previstos pelos modelos para cada um dos horizontes. A Figura 4.20 reforça essa afirmação, uma vez que se pode notar que o resultado da média da correlação linear para cada um dos meses de antecedência variou muito pouco, sendo obtido o valor de aproximadamente 0,74 para o horizonte de um mês e de aproximadamente 0,55 para o horizonte de quatro meses.

Figura 4.19 – Valores médios do coeficiente de correlação r obtidos para Três Marias para período de janeiro de 2001 a dezembro de 2018, para as quatro antecedências consideradas



Nas Figuras 4.21 e 4.22 são apresentados detalhes das previsões para os verões de 2014 e 2015, respectivamente, começando no mês de novembro do ano anterior e terminando no mês de março do ano analisado, uma vez que foram considerados os anos mais críticos de seca na

bacia. O mês de julho de 2013 (Figura 4.21), por exemplo, apresenta as médias mensais de vazão para os quatro meses seguintes (vazões previstas em cinza e observada em azul), sendo o mês de agosto a representação da previsão com um mês de antecedência, o mês de setembro a representação com dois meses e assim sucessivamente. Nota-se que, independente do horizonte de previsão, o modelo faz uma boa representação das vazões até o mês de dezembro, quando então há um forte crescimento das vazões previstas para os meses seguintes. Ou seja, para os meses de janeiro, fevereiro e março, as vazões previstas com base nas previsões de chuva do modelo Eta superestimaram as vazões observadas, não representando, portanto, o fenômeno de “seca” que ocorreu no verão de 2014.

Entretanto, para o ano de 2015 (Figura 4.22), embora as vazões previstas no mês de janeiro tenham sido superestimadas em todas as antecedenças consideradas, o modelo apresentou um bom desempenho nos dois meses seguintes. Para o mês de fevereiro, com exceção da previsão com quatro meses de antecedência (realizada em outubro de 2014), a vazão observada ficou dentro do intervalo do conjunto de previsões, enquanto o mês de março foi bem previsto para todas as antecedenças. Com relação a amplitude da faixa de valores de vazões previstas, estas tendem a ser menores nos meses que antecedem o mês de janeiro e após o mês de março, o que também é esperado uma vez que esse período de janeiro a março configura o mais chuvoso da bacia, o que aumenta a possibilidade de erros pelo modelo hidrológico.

Figura 4.20 – Médias mensais das previsões de vazão para Três Marias no período de novembro de 2013 a março de 2014, começando em julho de 2013 e terminando em fevereiro de 2014

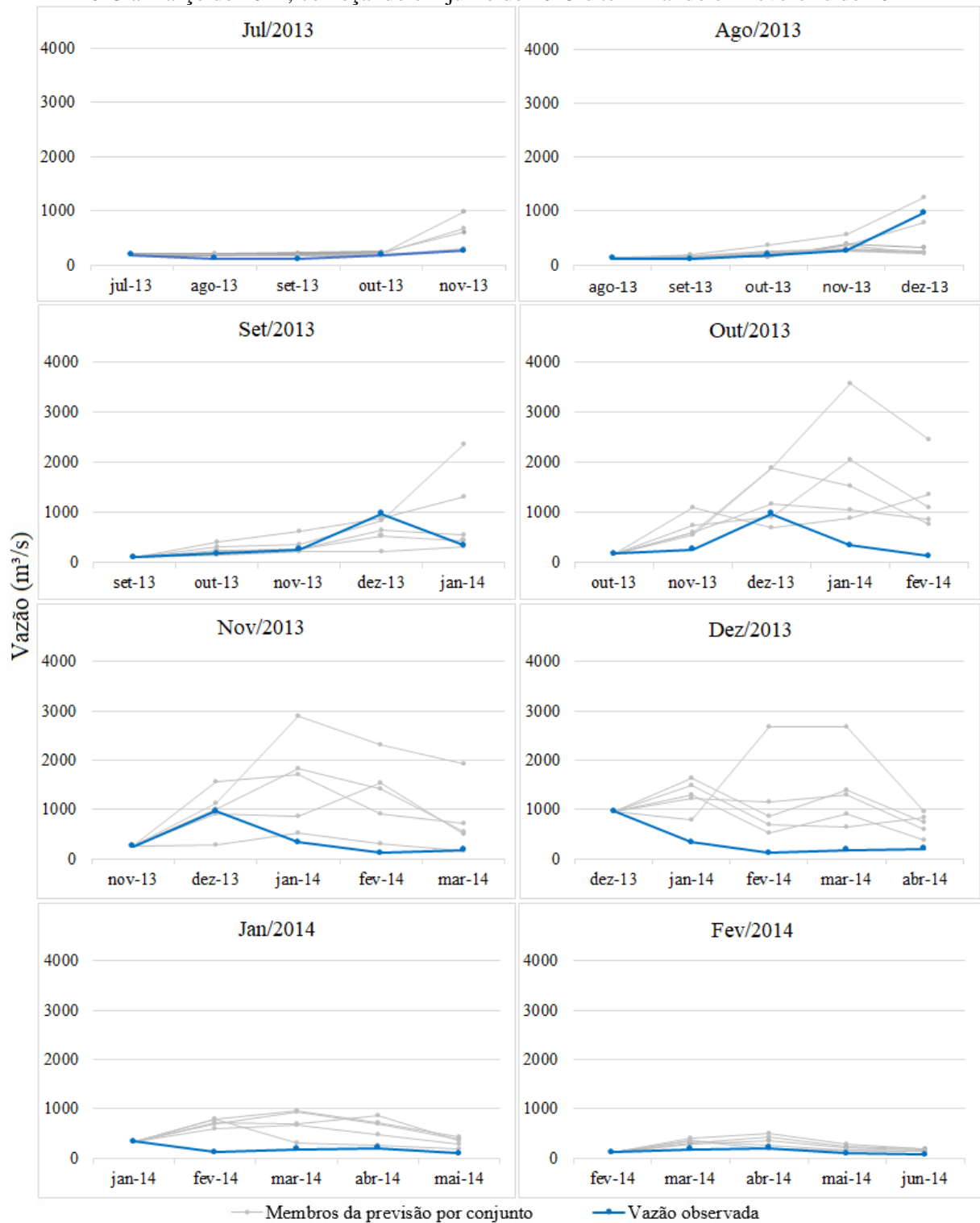
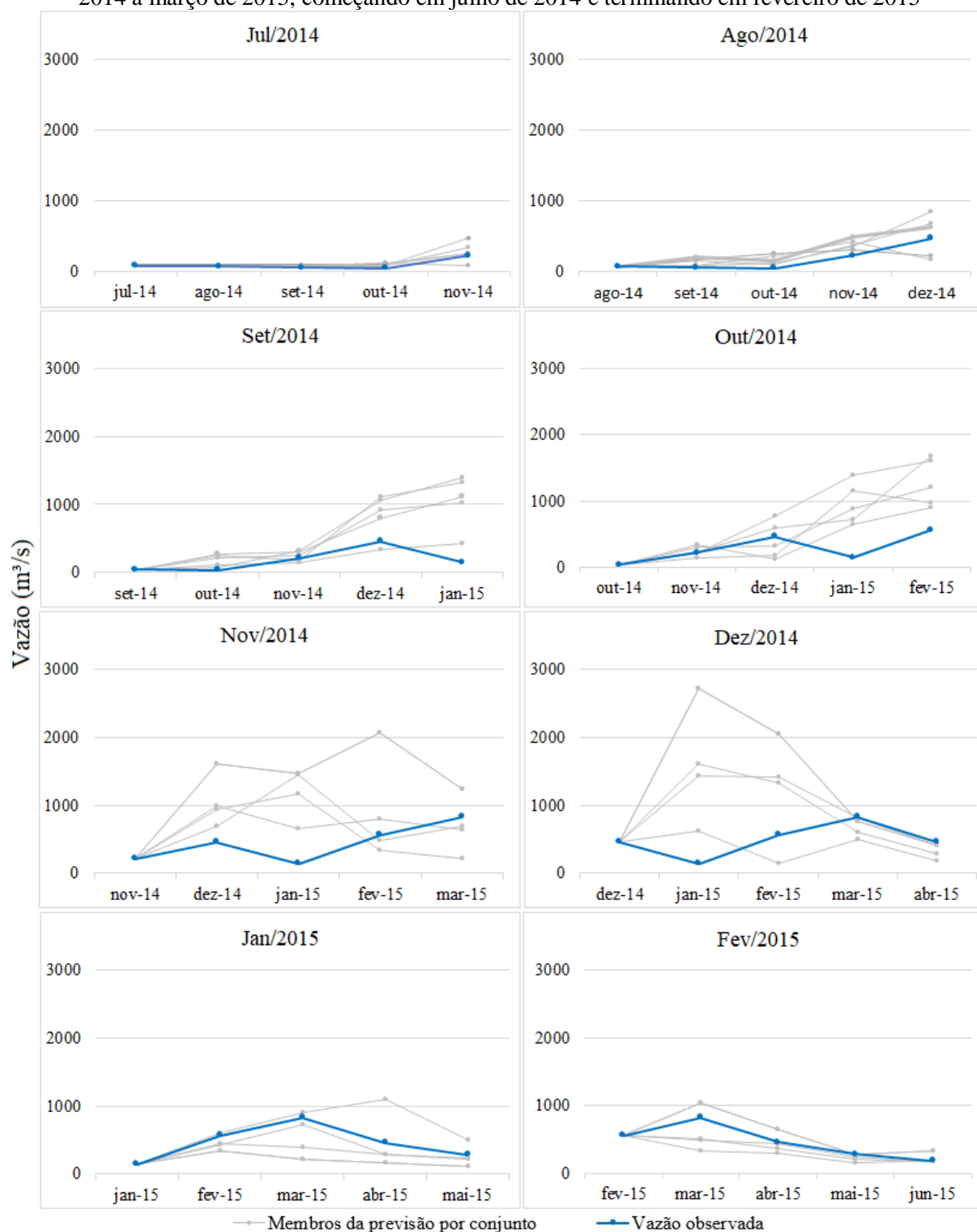


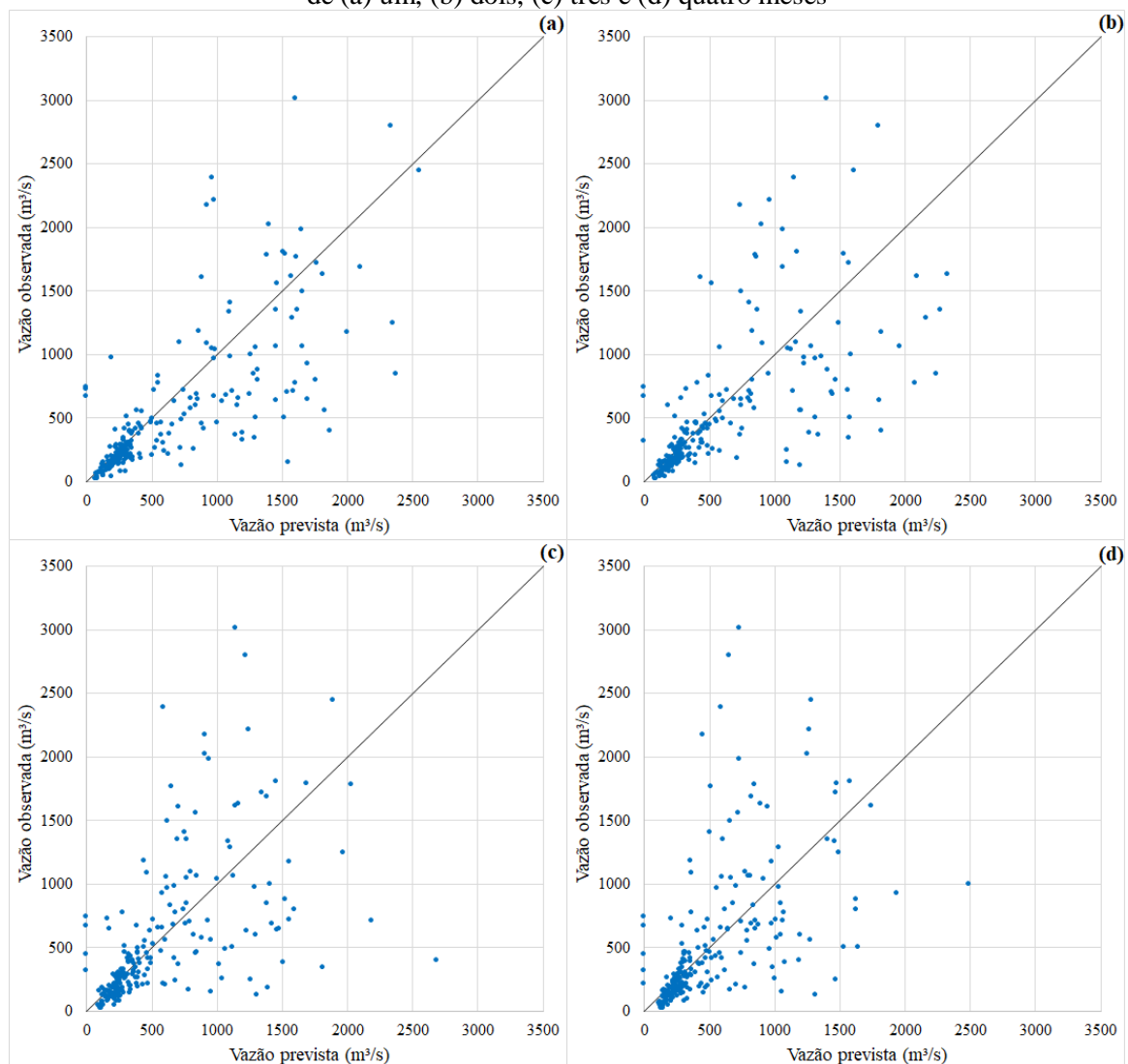
Figura 4.21 - Médias mensais das previsões de vazão para Três Marias no período de novembro de 2014 a março de 2015, começando em julho de 2014 e terminando em fevereiro de 2015



Embora os valores das funções objetivo do item 4.1 tenham sido satisfatórios, configurando um bom ajuste para Três Marias tanto na calibração quanto na verificação do MGB-IPH, pode-se ainda atribuir uma parcela dos erros (neste caso em específico,

superestimação dos valores de vazão principalmente para os verões de 2014 e 2015) ao desempenho do modelo hidrológico. Isso se deve provavelmente pelo fato dos ajustes terem sido realizados há mais de uma década antes da ocorrência das maiores amplitudes constatadas (a partir do verão de 2012) e, se tratando de uma região com grande aproveitamento hidrelétrico, podem ter ocorrido mudanças significativas no uso consuntivo de águas que acarretaram em inconsistências das vazões naturais que não foram, portanto, representadas pelo modelo. Entretanto, a análise da dispersão dos valores observados e previstos (Figura 4.23) de maneira geral não apresentou tendências de superestimativa ou subestimativa, com pontos muito dispersos sem erros sistemáticos aparentes, não sendo necessário, portanto, realizar a previsão dos resíduos para Três Marias.

Figura 4.22 – Correlação entre as vazões observadas e previstas para Três Marias para antecedências de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses



4.2.3 Resultados para Sobradinho

Para a análise do desempenho dos modelos em Sobradinho, as previsões de vazão diárias, assim como os dados observados, foram transformadas em médias mensais. Nas Figuras 4.24 e 4.25 são apresentadas as vazões obtidas de janeiro de 2001 a dezembro de 2018 para cada um dos horizontes de previsão: um, dois, três e quatro meses de antecedência. É possível observar que, de maneira geral, as análises visuais dos hidrogramas não demonstraram tendências de superestimativa ou subestimativa das vazões, uma vez que, principalmente para a antecedências de um a dois meses, as vazões observadas ficaram dentro do intervalo das vazões previstas, seja para os períodos de cheia ou para os períodos de estiagem. Esse comportamento, entretanto, já era esperado para previsões com menores antecedências devido à memória de alguns dos principais rios e ao longo tempo de propagação das vazões até o ponto de observação da sub bacia de Sobradinho.

Analizando a tendência dos erros relativos das médias mensais para Sobradinho, apresentados na Figura 4.26, é possível concluir que os valores elevados de EMR para todo o período foram mais uma vez influenciados pela baixa previsibilidade dos modelos a partir de 2012, embora em menor proporção do que para Três Marias. Tem-se, comparativamente, os valores de 87% e 79% para os horizontes de um e quatro meses, respectivamente, obtidos para o período de janeiro 2001 a agosto 2012, contra 38% e 23% para os mesmos horizontes no período de agosto 2012 a dezembro de 2018. Esse comportamento pode ser melhor observado na Figura 4.27, onde pode-se notar o aumento dos erros relativos das médias mensais a partir do verão de 2012-2013. Já em relação às antecedências, essas novamente mostraram não diferir muito nos valores de vazão para cada um dos horizontes, como pode-se observar na Figura 4.28. Pode-se notar que o resultado da média da correlação linear para cada um dos horizontes de previsão também variou pouco, apresentando o valor de aproximadamente 0,88 para o horizonte de um mês e de aproximadamente 0,70 para o horizonte de quatro meses.

Com relação ao verão de 2014, representado na Figura 4.29, observa-se que o mês de novembro foi bem representado para todas as antecedências, enquanto o mês de dezembro apresentou uma leve subestimativa das previsões para a antecedência de três meses. O mesmo ocorreu para o mês de janeiro, que também apresentou uma subestimativa para um dos horizontes de previsão, neste caso para a antecedência de quatro meses. Já os meses de fevereiro e março foram bem representados nos horizontes de três e quatro meses de antecedência, porém o modelo superestimou as vazões previstas nos horizontes menores, de um e dois meses.

Figura 4.23 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Sobradinho no período de 01/01/2001 a 31/07/2012 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

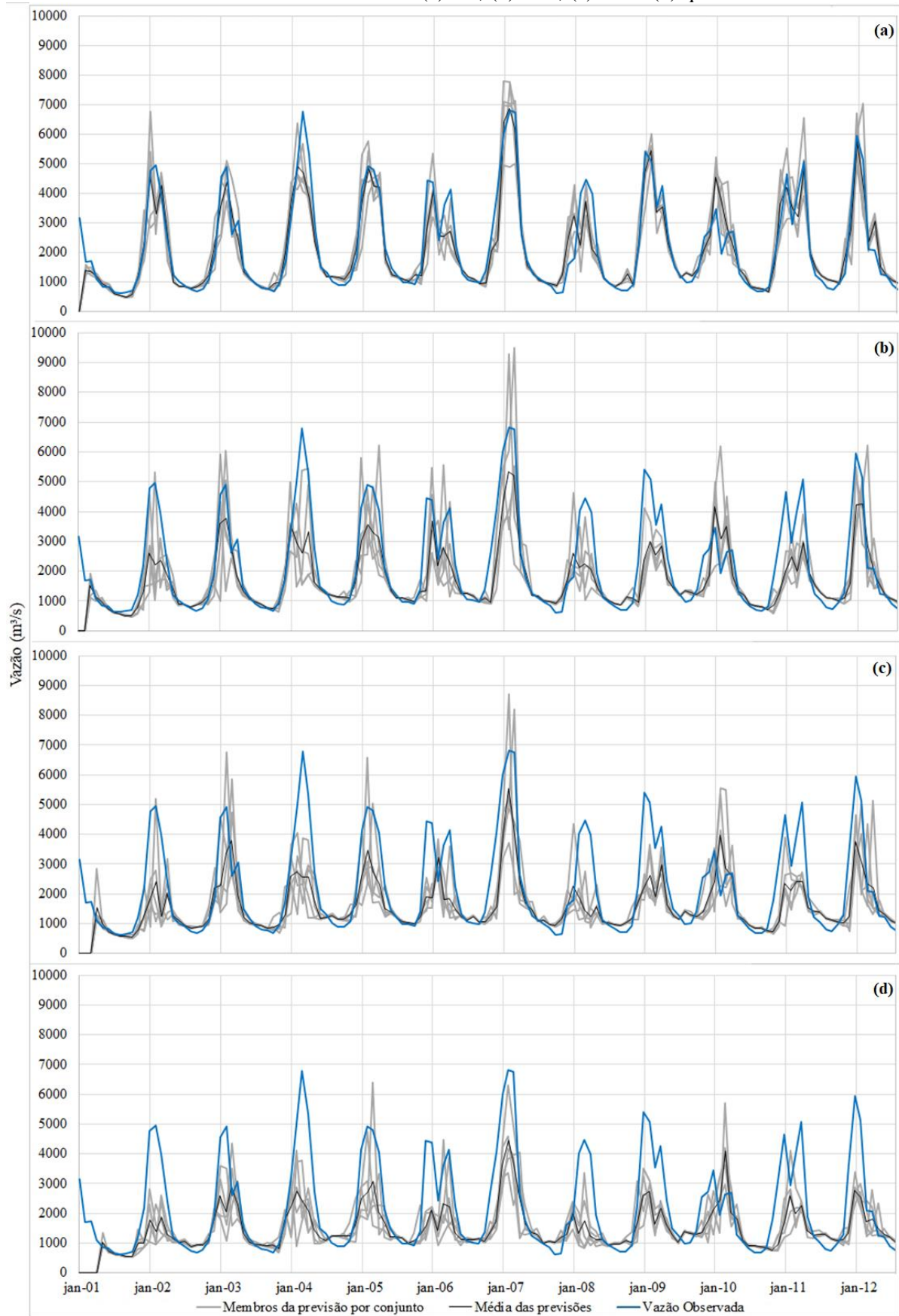


Figura 4.24 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Sobradinho no período de 01/08/2012 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

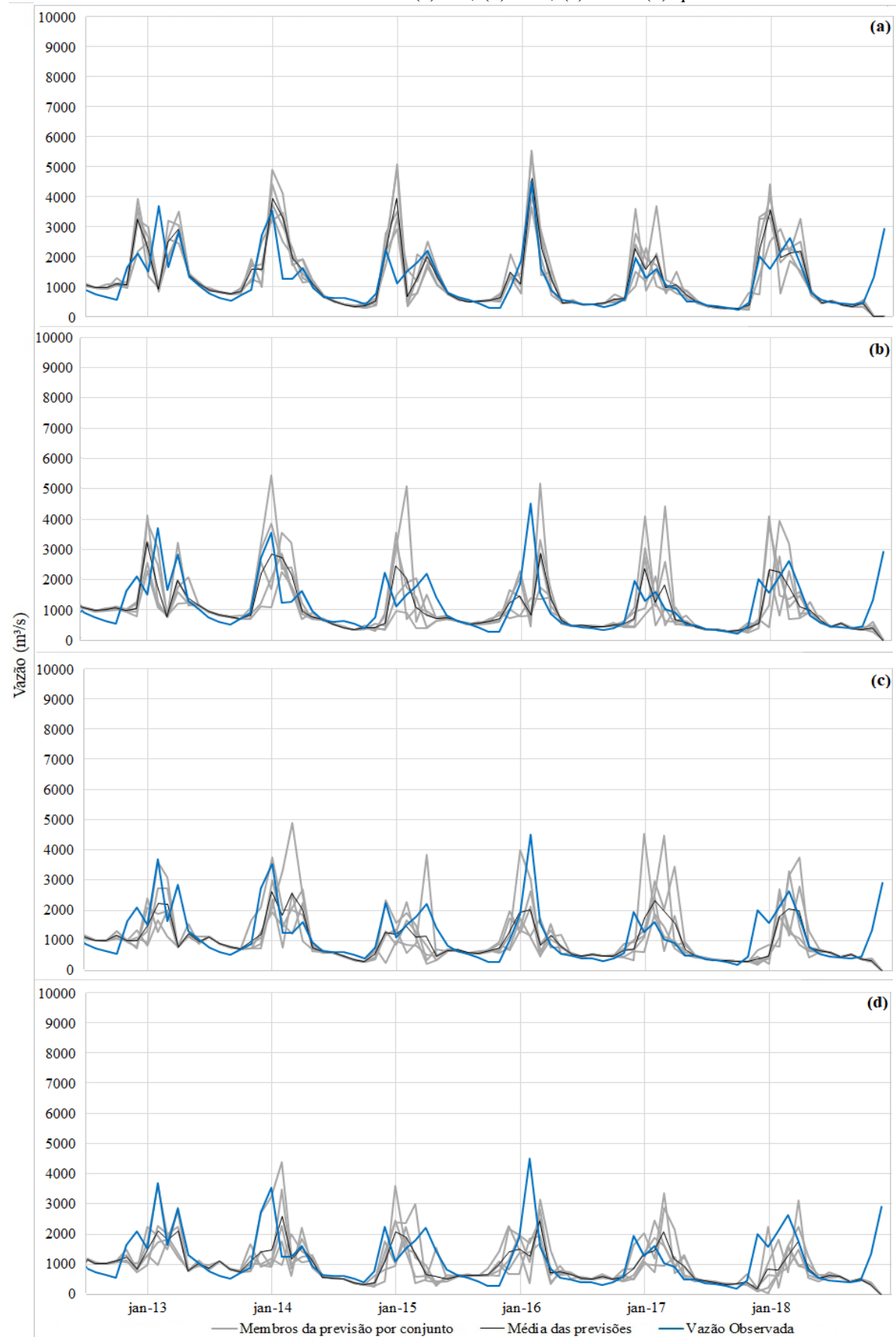


Figura 4.25 - Valores de EMR obtidos para Sobradinho para as quatro antecedências consideradas, com enfoque na análise separada dos períodos antes e depois de agosto de 2012

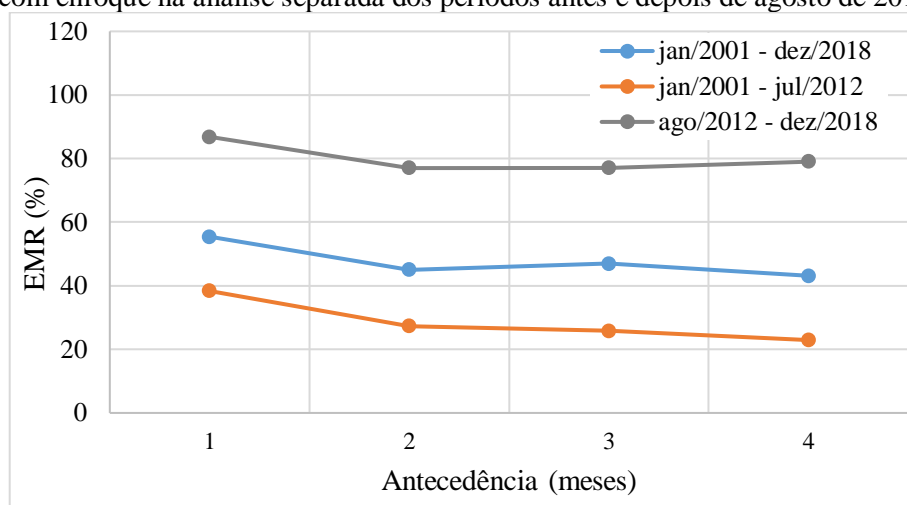


Figura 4.26 - Erros médios obtidos para cada mês entre os anos de 2001 a 2018, quando comparadas as vazões previstas e observadas para Sobradinho, para cada uma das antecedências consideradas

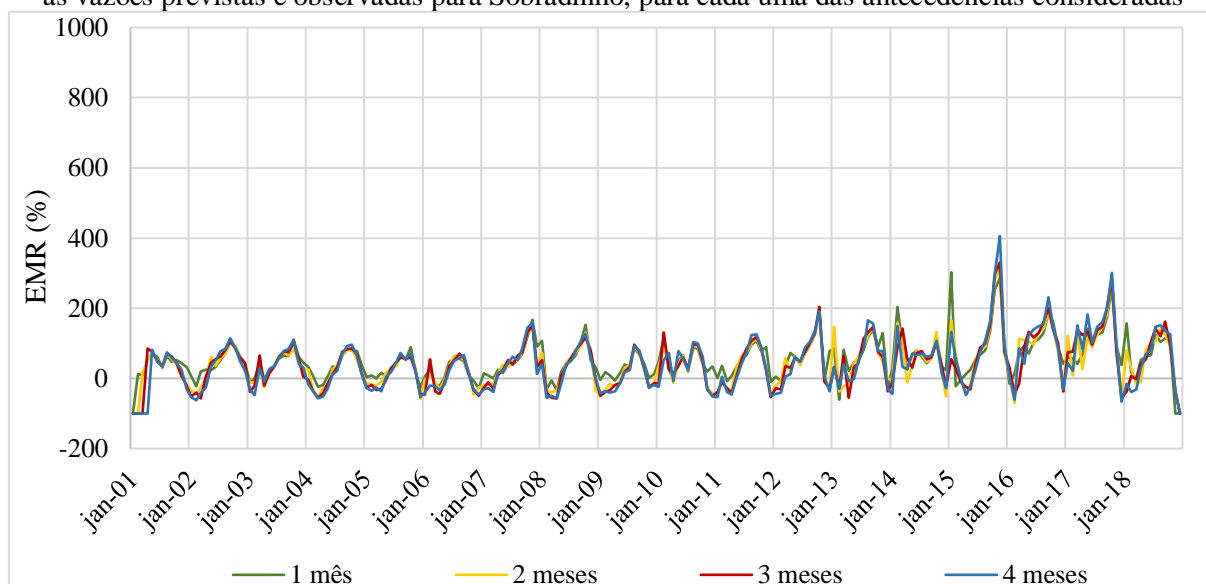


Figura 4.27 - Valores médios do coeficiente de correlação r obtidos para Sobradinho para período de janeiro de 2001 a dezembro de 2018, para as quatro antecedências consideradas

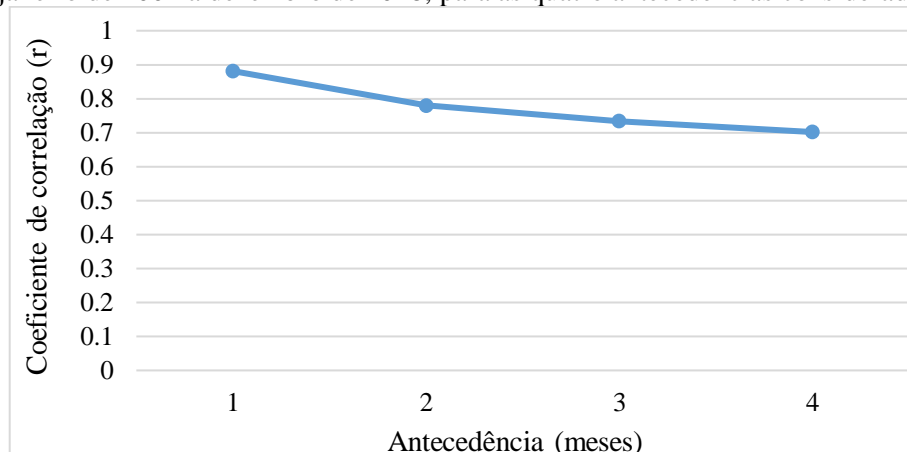
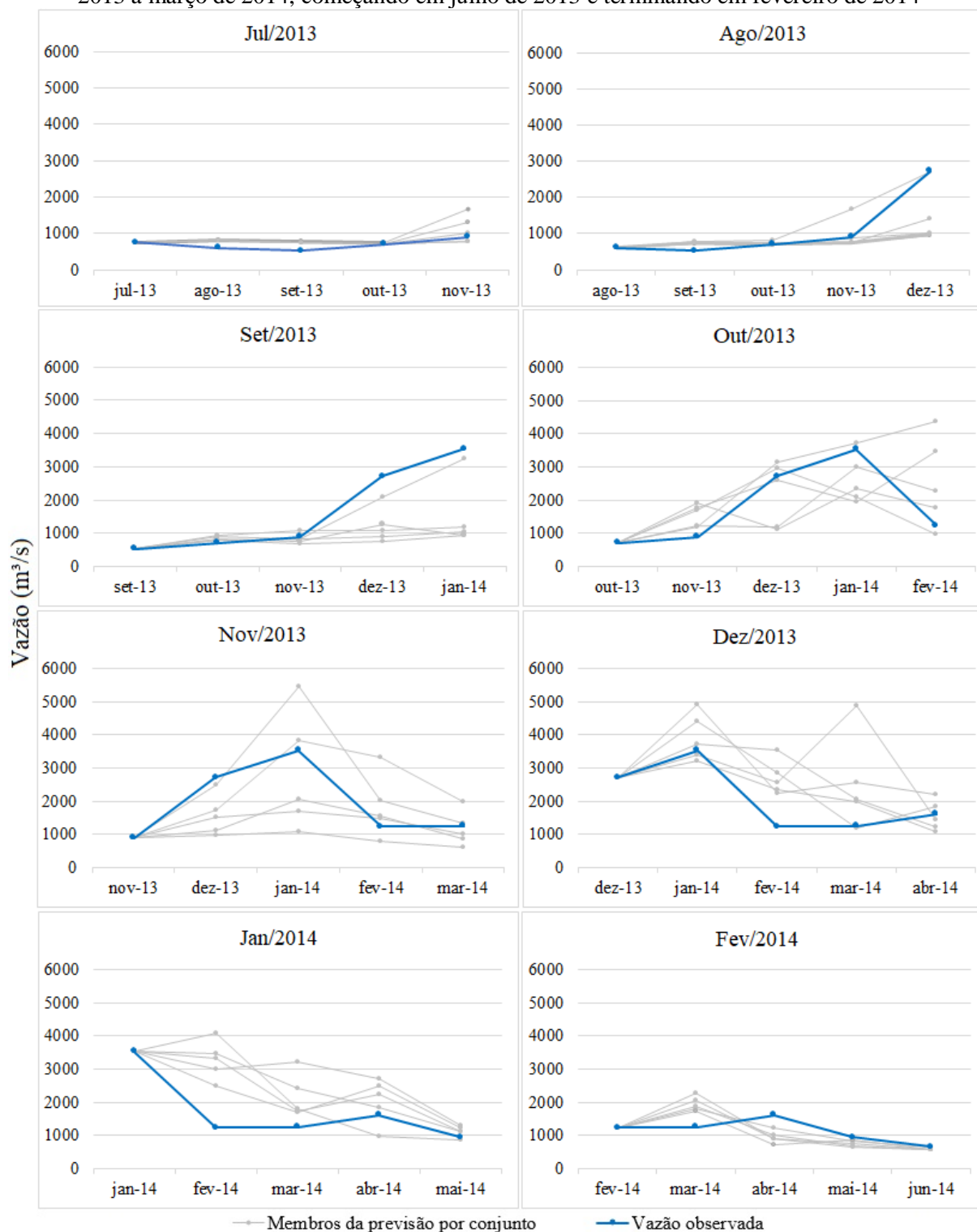
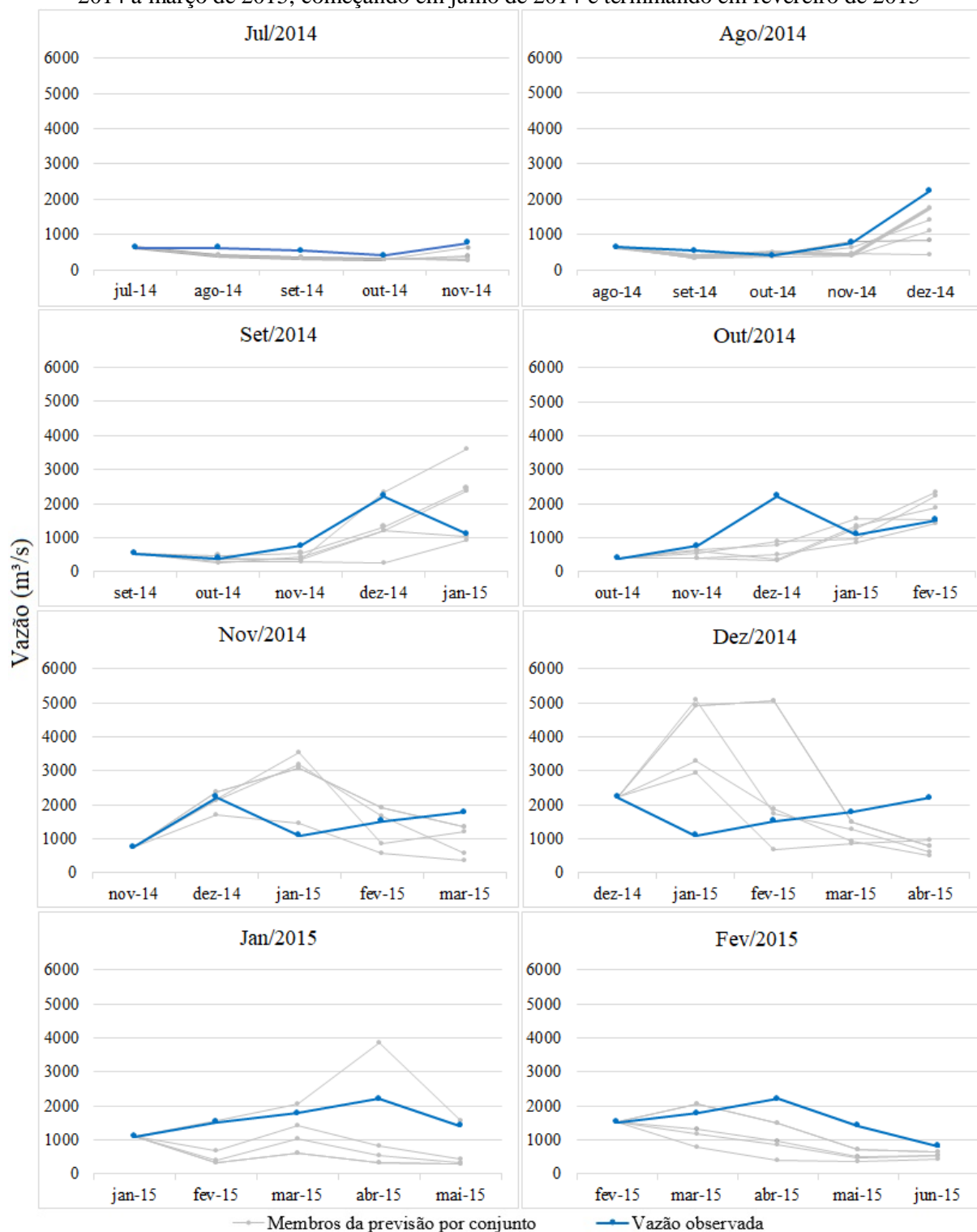


Figura 4.28 – Médias mensais das previsões de vazão para Sobradinho no período de novembro de 2013 a março de 2014, começando em julho de 2013 e terminando em fevereiro de 2014



Já para o verão de 2015 (Figura 4.30), o mês de novembro apresentou uma leve subestimação das vazões previstas para todos os horizontes de previsão analisados, e o mesmo ocorreu para o mês de dezembro nas previsões com dois e quatro meses de antecedência.

Figura 4.29 - Médias mensais das previsões de vazão para Sobradinho no período de novembro de 2014 a março de 2015, começando em julho de 2014 e terminando em fevereiro de 2015

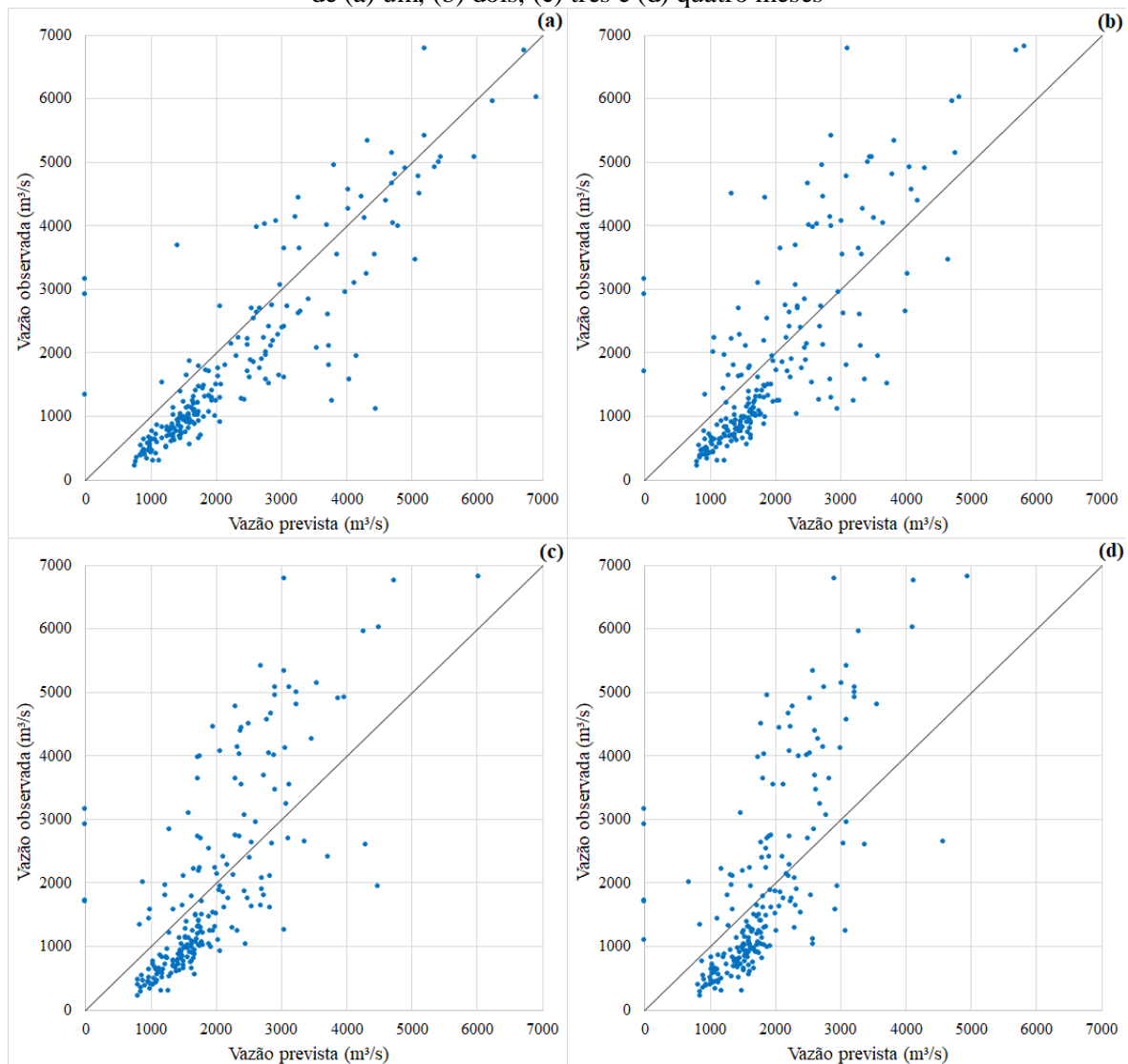


O mês de dezembro, aliás, foi o que apresentou os maiores valores de vazão nesse verão, seguido de uma redução significativa no mês de janeiro que não foi prevista pelo modelo, resultando em um retardo dos picos de vazão. O mês de janeiro, portanto, apresentou tendências de superestimativa das vazões previstas para os menores horizontes de previsão, neste caso para

um e dois meses de antecedência. Já os meses de fevereiro e março foram considerados bem previstas pelo modelo, em que as vazões observadas ficaram dentro do intervalo de previsões, com exceção apenas para uma leve subestimativa para as antecedências de três e quatro meses em relação ao mês de março, que pode ser explicado pelo acúmulo de erros nas antecedências maiores devido a redução da influência das condições iniciais.

Entretanto, a análise da dispersão dos valores observados e previstos (Figura 4.31) para Sobradinho apresentou uma tendência de superestimação das vazões menores para todos os horizontes de previsão, além de subestimação das vazões maiores para os horizontes de três e quatro meses. Neste caso caberia, portanto, o uso de um modelo de previsão de resíduos a fim de corrigir esses erros sistemáticos, que poderia ser do tipo estocástico ou função de transferência, ambos utilizados por Silva (2005) nas previsões de curto prazo da mesma bacia.

Figura 4.30 – Correlação as entre as vazões observadas e previstas para Sobradinho para antecedências de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses



É importante lembrar que, para todos os valores de vazão do conjunto de previsões para Sobradinho, foi retirado o valor fixo de 500 m³/s assim como realizado no período de verificação do MGB, pelo mesmo motivo relatado anteriormente no item 4.1. Além disso, tanto no caso de Sobradinho quanto das outras usinas, deve-se considerar também que uma parcela das incertezas do MGB pode ser atribuída ao uso das vazões naturalizadas dos reservatórios, obtidas de técnicas indiretas de estimativa de vazões e que já provaram influenciar tanto no retardo quanto na amenização de picos de cheia (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988).

4.2.4 Discussão geral acerca da previsibilidade sazonal pelos modelos Eta/MGB

Com relação ao desempenho dos modelos Eta/MGB especificamente em Três Marias e Sobradinho, Silva (2005) também havia realizado uma análise das previsões de vazão de longo prazo nessas sub bacias, porém para o período de 1998 a 2003. Com relação à primeira, o autor obteve os seguintes valores para o EMR: 77% para a antecedência de um mês, 68% para as antecedências de 2 e 3 meses e 60% para a antecedência de 4 meses. Logo, comparando com as médias obtidas para todo o período analisado neste trabalho (2001 a 2018), tem-se que as previsões para Três Marias melhoraram, uma vez que o maior valor de EMR foi de aproximadamente 51% para o horizonte de um mês. Já em relação à Sobradinho, Silva (2005) obteve os seguintes valores aproximados de EMR: 31% para a antecedência de um mês, 42% para a antecedência de dois meses, 56% para três meses e 47% para quatro meses. Comparando novamente com as médias totais obtidas para este trabalho, observou-se uma melhora do desempenho dos modelos apenas para os horizontes de três e quatro meses, uma vez que os valores de EMR para as menores antecedências foram relativamente mais altos, possivelmente influenciados pela baixa previsibilidade para o período após agosto de 2012.

Uma metodologia interessante a se considerar em relação a otimização das previsões sazonais é a utilização de uma técnica de combinação de vários modelos hidrológicos ao invés de apenas um, como proposto por Najafi e Moradkhani (2016). Os autores adotaram modelos com complexidades variadas na geração de previsão de vazões de longo prazo em quatro bacias no oeste dos Estados Unidos, sendo utilizada uma série de índices para medir o desempenho desses modelos, como EMR, regressão linear restrita, inferência Bayesiana, dentre outros. Com relação aos valores de EMR, índice também utilizado no presente estudo, estes foram extremamente baixos, variando de 0,48% a 10%, o que mostrou uma boa acurácia das previsões independente do modelo utilizado. Entretanto, os menores valores de EMR, assim como os

melhores valores obtidos para os demais índices, foram atribuídos à utilização da técnica de combinação de mais de um modelo hidrológico juntamente com a previsão por conjunto, que superou a melhor previsão de um único modelo. Sugere-se, portanto, que essa abordagem pode ser considerada eficaz para aumentar a confiabilidade e precisão das previsões sazonais de vazão (NAJAFI; MORADKHANI, 2016).

Já em relação ao índice de correlação linear de Pearson, esse foi utilizado também nos trabalhos de Cossich, Cataldi e Rotunno Filho (2015) e Sahu et al. (2016) para avaliar a qualidade das previsões sazonais de vazão na bacia do Rio Grande (Brasil) e nas bacias da Indonésia, respectivamente. Os primeiros autores avaliaram dois cenários de afluições da bacia, sendo um deles considerando tanto dados de vazões passadas quanto informações de precipitação. Para esse cenário, comparadas as vazões previstas e observadas, foram obtidos valores de correlação entre 0,73 e 0,89 para os horizontes de um a três meses de previsão, concluindo, portanto, que o modelo representou bem o comportamento sazonal da vazão para todas as antecedências analisadas (COSSICH; CATALDI; ROTUNNO FILHO, 2015). Já Sahu et al. (2016) utilizaram previsões de precipitação por conjunto de dois modelos climáticos globais, ECHAM4-MOM3 e CFSv2, como dados de entrada para previsões mensais de vazão. Os valores de correlação de Pearson obtidos variaram de 0,58 a 0,67 e foram considerados razoáveis pelos autores (SAHU et al., 2016), sendo esses relativamente próximos aos obtidos neste trabalho para todas as antecedências consideradas (Figura 4.11).

Além disso, aponta-se para a necessidade da atualização da caracterização fisiográfica do São Francisco a fim de melhorar o ajuste do modelo hidrológico, uma vez que as alterações no uso e cobertura do solo e demais interferências humanas como regulação de reservatórios, irrigação de sistemas de cultivo e bombeamento subterrâneo podem afetar significativamente a dinâmica da evapotranspiração e da umidade do solo, conforme observado por Yuan, Wood e Ma (2015). Logo, o uso da versão mais recente do MGB pode melhorar os resultados principalmente nas regiões das chamadas “zonas de inundação” (PONTES et al., 2017), como nas áreas dos reservatórios das usinas ou nas planícies do Sub Médio São Francisco, onde o rio é mais largo.

Por fim, recomenda-se também investigar o comportamento das correlações entre as vazões previstas e observadas para todas as sub bacias que apresentaram erros médios superiores a 25%, devido aos erros sistemáticos encontrados em Sobradinho, principalmente para os horizontes de três e quatro meses. Além da metodologia mencionada no item 4.2.3, outras abordagens de correção de viés podem ser utilizadas, como o emprego de métodos de

escalonamento linear simples (CROCHEMORE; RAMOS; PAPPENBERGER, 2016), processos de transformação logarítmica (WOLDEMESKEL et al., 2018), modelos autorregressivos (ADNAN et al., 2017), dentre outros, sendo a metodologia mais adequada definida dependendo da necessidade e da aplicabilidade ao comportamento do erro em específico.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi avaliado o desempenho dos modelos Eta/MGB com relação às previsões sazonais de vazão para o rio São Francisco, sendo considerados os horizontes de um a quatro meses. Pode-se concluir, portanto, que de maneira geral as previsões geradas foram satisfatórias, apresentando potencial para servir como uma informação complementar na gestão hídrica da bacia, principalmente nas questões que envolvem o conhecimento da disponibilidade hídrica com certa antecedência no tempo. Entretanto, atenta-se para alguns problemas pontuais e demais limitações que deverão ser corrigidos para melhorar a acurácia das previsões, abordados anteriormente no item 4.2.4.

Na etapa de ajuste do modelo hidrológico, o primeiro problema encontrado foi a questão das grandes falhas no banco de dados de chuva e vazão. Embora os dados disponíveis tenham sido suficientes para a realização de uma boa calibração do MGB-IPH, a carência desses dados pode comprometer as avaliações de eventos singulares de extremos hidrológicos com maiores detalhes, uma vez que dependem de séries observadas de boa qualidade. Além disso, a inconsistência das séries de vazões principalmente nas sub bacias afluentes da UHE de Sobradinho podem ter contribuído também para as incertezas nessa sub bacia, que precisou de retiradas constantes no valor de 500 m³/s para se ajustar melhor às previsões. Já em relação aos dados pluviométricos, as inconsistências foram observadas principalmente na região do semi-árido do Médio e Sub Médio São Francisco. Uma possível solução para a correção dessas falhas seria a utilização de combinações de precipitações observadas com estimativas de precipitação por satélite, como no caso dos produtos do MERGE do CPTEC/INPE.

Com relação ao desempenho dos modelos atmosférico e hidrológico, testado por meio dos índices EMR, EMA e coeficiente de correlação r , foi observado que as vazões foram melhores previstas para as maiores antecedências (três e quatro meses) em relação ao EMR, enquanto que para o coeficiente r as previsões foram melhores para os horizontes menores (um e dois meses). Já o EMA não foi considerado um bom índice para testar a qualidade das previsões, sendo recomendada, portanto, a utilização de um outro índice para avaliar melhor o desempenho dos modelos em relação aos horizontes de previsão. Ainda em relação ao desempenho dos modelos, quando analisadas especificamente as sub bacias de Três Marias e Sobradinho, observou-se que os piores valores para os índices de desempenho utilizados corresponderam ao período entre os anos de 2012 e 2018, demonstrando que o modelo apresentou dificuldades para representar os eventos hidrológicos ocorridos nesses anos. Uma

parcela dos erros nesse período em particular, principalmente com relação aos eventos de maior variabilidade hidrológica, pode ser atribuída a problemas nas previsões de chuva inerentes ao modelo atmosférico, que acabaram não se compensando pelo MGB, conforme apontado anteriormente no item 4.2.1. Logo uma correção da distribuição temporal da chuva prevista tende a apresentar vantagens com relação a melhoria da acurácia das vazões previstas sazonalmente.

Ainda assim, tendo em consideração o histórico de previsões de vazão no horizonte sazonal para a bacia e os resultados obtidos para todos os índices de desempenho analisados, concluiu-se que a utilização de um período maior para a análise de previsões (neste caso de 18 anos) e os desenvolvimentos das previsões de precipitação pelo Eta contribuíram para a melhora da correlação entre os valores previstos e observados, embora sejam necessários aperfeiçoamentos nas predições de eventos extremos e com alta variabilidade hidrológica.

REFERÊNCIAS

- ADAM, K. N.; FAN, F. M.; PONTES, P. R.; BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W. Mudanças climáticas e vazões extremas na bacia do rio Paraná. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 999-1007, out./dez. 2015. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=156&SUMARIO=5125>. Acesso em: 11 jul. 2019.
- ADNAN, R. M.; YUAN, X.; KISI, O.; YUAN, Y. Streamflow forecasting of Astore river with Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average Model. **European Scientific Journal**, Kocani, v. 13, i. 12, p. 145-156, apr. 2017. Disponível em: <http://eujournal.org/index.php/esj/article/view/9120>. Acesso em: 20 jul. 2019.
- ALEXANDER, S.; WU, S.; BLOCK, P. Model selection based on sectoral application scale for increased value of hydroclimate-prediction information. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston, v. 145, i. 5, p. 1-11, may 2019. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29WR.1943-5452.0001044>. Acesso em: 16 out. 2018.
- AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; ROCHA, R. P.; LLOPART, M. The state of the art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America. **Annals of the New York Academy of Sciences**, Hoboken, v. 1436, i. 1, p. 98-120, jan. 2019. Disponível: <https://nyaspubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/nyas.13932>. Acesso em: 16 maio 2019.
- ANGHILERI, D.; VOISIN, N.; CASTELLETTI, A.; PIANOSI, F.; NIJSSEN, B.; LETTENMAIER, D. P. Value of long-term streamflow forecasts to reservoir operations for water supply in snow-dominated river catchments. **Water Resources Research**, Washington, v. 52, p. 4209-4225, june 2016. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2015WR017864>. Acesso em: 17 dez. 2018.
- BELL, V. A.; DAVIES, H. N.; KAY, A. L.; BROOKSHAW, A.; SCAIFE, A. A. A national-scale seasonal hydrological forecast system: development and evaluation over Britain. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 21, i. 9, p. 4681-4691, sep. 2017. Disponível em: <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/21/4681/2017/>. Acesso em: 12 jul. 2019.
- BENNETT, J. C.; WANG, Q. J.; LI, M.; ROBERTSON, D. E.; SCHEPEN, A. Reliable long-range ensemble streamflow forecasts: Combining calibrated climate forecasts with a conceptual runoff model and a staged error model. **Water Resources Research**, Washington, v. 52, p. 8238-8259, oct. 2016. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016WR019193>. Acesso em: 10 maio 2019.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. 1997. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm. Acesso em: 13 nov. 2018.

BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Verificação da eficiência e eficácia de um algoritmo evolucionário multi-objetivo na calibração automática do modelo hidrológico IPH II. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 14, n. 3, p. 37-50, jul./set. 2009. Disponível: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=10&SUMARIO=131>. Acesso em: 15 abr. 2019.

BROWN, J. N.; HOCHMAN, Z.; HOLZWORTH, D.; HORAN, H. Seasonal climate forecasts provide more definitive and accurate crop yield predictions. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 260-261, p. 247-254, oct. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192318301862>. Acesso em: 07 jun. 2019.

CALDWELL, P. V.; KENNEN, J. G.; SUN, G.; KIANG, J. E.; BUTCHER, J. B.; EDDY, M. C.; HAY, L. E.; LAFONTAINE, J. H.; HAIN, E. F.; NELSON, S. A. C.; MCNULTY, S. G. A comparison of hydrologic models for ecological flows and water availability. **Ecohydrology**, Hoboken, v. 8, p. 1525-1546, feb. 2015. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/eco.1602>. Acesso em: 07 abr. 2019.

CALVIN, K.; WISE, M.; KYLE, P.; CLARKE, L.; EDMONDS, J. A hindcast experiment using the GCAM 3.0 agriculture and land-use module. **Climate Change Economics**, Singapore, v. 8, i. 1, p. 1-21, mar. 2017. Disponível em: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S2010007817500051>. Acesso em: 16 jul. 2019.

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Pró-Recursos Hídricos CAPES/ANA. **Editais 16/2017 - Resultado Final**. 2018. Disponível em: https://www.capes.gov.br/images/stories/download/editais/resultados/180117-Edital_16_2017_ANA_resultado.pdf. Acesso em: 13 nov. 2018.

CBHSF – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **Resumo Executivo do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2016-2025**. Alagoas: CBHSF, 2016. 300 p. Disponível em: <https://cbhsaofrancisco.org.br/documentacao/plano-de-recursos-hidricos-2016-2025/>. Acesso em: 22 nov. 2018.

CHEN, J.; BRISSETTE, F. P.; POULIN, A.; LECONTE, R. Overall uncertainty study of the hydrological impacts of climate change for a canadian watershed. **Water Resources Research**, Washington, v. 47, i. 12, p. 1-16, dec. 2011. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011WR010602>. Acesso em: 29 jun. 2019.

CHOU, S. C.; BUSTAMANTE, J. F.; GOMES, J. L. Evaluation of Eta Model seasonal precipitation forecasts over South America. **Nonlinear Processes in Geophysics**, Göttingen, v. 12, i. 4, p. 537-555, june 2005. Disponível em: <https://www.nonlin-processes-geophys.net/12/537/2005/>. Acesso em: 21 fev. 2020.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECHYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta simulations nested in three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, Wuhan, v. 3, i. 5, p. 438-454, dec. 2014. Disponível em: <https://www.scirp.org/Journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52877>. Acesso em: 15 maio 2019.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. 1 ed. Singapore: McGraw-Hill, 1988.

CLARK, M. P.; BIERKENS, M. F. P.; SAMANIEGO, L.; WOODS, R. A.; UIJLENHOET, R.; BENNETT, K. E.; PAUWELS, V. R. N.; CAI, X.; WOOD, A. W.; PETERS-LIDARD, C. D. The evolution of process-based hydrologic models: historical challenges and the collective quest for physical realism. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 21, i. 7, p. 3427-3440, july 2017. Disponível em: <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/21/3427/2017/>. Acesso em: 08 abr. 2019.

COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, Berlin, v. 125, i. 3-4, p. 769-784, aug. 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-015-1540-9>. Acesso em: 08 dez. 2019.

COLLISCHONN, W.; BRAVO, J. M.; SILVA, B. C.; RODRIGUEZ, D. A. Modelagem hidrológica. In: LIMA, J. W. M.; COLLISCHONN, W.; MARENGO, J. A. (orgs.) **Efeitos das mudanças climáticas na geração de energia elétrica**. 1 ed. São Paulo: AES Tietê, 2014. p. 95-143.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Ajuste multiobjectivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 3, p. 27-39, jul./set. 2003. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=35&SUMARIO=513>. Acesso em: 20 maio 2019.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 6, n. 1, p. 95-118, jan./mar. 2001. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=42&SUMARIO=625>. Acesso em: 20 maio 2019.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Previsão sazonal de vazão na bacia do rio Uruguai 2: previsão climática-hidrológica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 61-72, out./dez. 2005. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=26&SUMARIO=444>. Acesso em: 17 dez. 2018.

CORRÊA, C. S.; REBOITA, M. S.; CAMILLO, G. L.; COUTO, V. M.; CORRÊA, F. N. Intraseasonal climate forecast for the Alcântara region in northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 11, i. 6, p. 1963-1970, dec. 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/237504>. Acesso em: 16 maio 2019.

COSSICH, W.; CATALDI, M.; ROTUNNO FILHO, O. C. Avaliação do desempenho da geração de cenários de afluições em reservatórios utilizando previsões de precipitação por conjunto. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 37, ed. especial V SIC, p. 55-62, mar. 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/16215/pdf>. Acesso em: 13 mar. 2020.

CROCHEMORE, L.; RAMOS, M.; PAPPENBERGER, F. Bias correcting precipitation forecasts to improve the skill of seasonal streamflow forecasts. **Hidrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 20, i. 9, p. 3601-3618, sep. 2016. Disponível em: <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/20/3601/2016/>. Acesso em: 20 jul. 2019.

CRUZ, M. A. S.; MOTA, P. V. M.; ARAGÃO, R.; ROCHA, R. O. F. Avaliação das precipitações geradas pelo modelo climático regional ETA-HadGEM2-ES para o Estado de Sergipe. **Scientia Plena**, São Cristóvão, v. 13, n. 10, p. 1-9, out. 2017. Disponível em: <https://www.scientiaplenu.org.br/sp/article/view/3790>. Acesso em: 07 jul. 2019.

CUO, L.; PAGANO, T. C.; WANG, Q. J. A review of quantitative precipitation forecasts and their use in short- to medium-range streamflow forecasting. **Journal of Hydrometeorology**, Boston, v. 12, p. 713-728, oct. 2011. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2011JHM1347.1>. Acesso em: 07 dez. 2018.

CUSTODIO, M. S.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T.; VIDALE, P. L. Avaliação da climatologia na região amazônica nos modelos da família HiGEM. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 1054-1063, maio/ago. 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/18005>. Acesso em: 15 maio 2019.

DAOUD, A. B.; SAUQUET, E.; BONTRON, G.; OBLED, C.; LANG, M. Daily quantitative precipitation forecasts based on the analogue method: Improvements and application to a French large river basin. **Atmospheric Research**, Amsterdam, v. 169, p. 147-159, mar. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809515002951>. Acesso em: 10 maio 2019.

DARIANE, A. B.; FARHANI, M.; AZIMI, S. Long term streamflow forecasting using a hybrid entropy model. **Water Resources Management**, New York City, v. 32, i. 4, p. 1439-1451, jan. 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-017-1878-0>. Acesso em: 20 dez. 2018.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2019: Ano base 2018**. Rio de Janeiro: EPE, 2019. 292 p. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>. Acesso em: 04 dez. 2019.

EVANS, J.; MCGREGOR, J.; MCGUFFIE, K. Future Regional Studies. In: HENDERSON-SELLERS, A.; MCGUFFIE, K (orgs.). **The future of the world's climate**. 2 ed. Amsterdam: Elsevier Science, 2012. p. 223-250.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; QUIROZ, K. J.; SORRIBAS, M. V.; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. A. Flood forecasting on the Tocantins River using ensemble rainfall forecasts and real-time satellite rainfall estimates. **Journal of Flood Risk Management**, Hoboken, v. 9, i. 3, p. 278-288, sep. 2016c. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfr3.12177>. Acesso em: 11 jul. 2019.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; MELLER, A.; BOTELHO, L. C. M. Ensemble streamflow forecasting experiments in a tropical basin: the São Francisco river case study. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 519, p. 2906-2919, nov. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169414003126>. Acesso em: 29 abr. 2019.

FAN, F. M.; MELLER, A.; COLLISCHONN, W. Incorporação de filtro numérico de separação de escoamento na assimilação de dados para previsão de vazões utilizando modelagem hidrológica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 472-483, abr./jun. 2015. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=157&SUMARIO=5072>. Acesso em: 07 dez. 2018.

FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C. Sobre o uso da persistência de previsões determinísticas de vazão para a tomada de decisão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 31, n. 2, p. 218-228, abr./jun., 2016a. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862016000200218. Acesso em: 07 dez. 2018.

FAN, F. M.; RAMOS, M. H.; COLLISCHONN, W. Sobre o uso de previsões hidrológicas probabilísticas para tomada de decisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 914-926, out./dez. 2015. Disponível: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=156&SUMARIO=5117>. Acesso em: 17 dez. 2018.

FAN, F. M.; SCHWANENBERG, D.; ALVARADO, R.; REIS, A. A.; COLLISCHONN, W.; NAUMMAN, S. Performance of deterministic and probabilistic hydrological forecasts for the short-term optimization of a tropical hydropower reservoir. **Water Resources Management**, New York City, v. 30, i. 10, p. 3609-3625, June 2016b. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-016-1377-8>. Acesso em: 16 dez. 2018.

FISEHA, B. M.; STEGN, S. G.; MELESSE, A. M.; VOLPI, E.; FIORI, A. impact of climate change on the hydrology of upper Tiber river basin using bias corrected regional climate model. **Water Resources Management**, New York City, v. 28, i. 5, p. 1327-1343, mar., 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-014-0546-x>. Acesso em: 29 jun. 2019.

FRANCO, V. S.; SOUZA, E. B.; LIMA, A. M. M.; SOUZA, A. L.; PINHEIRO, A. N.; DIAS, T. S.; AZEVEDO, F. M. Climatologia e previsão hidrológica de cheia sazonal do rio Xingu, Altamira-PA. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 22, p. 1-19, jan./jun. 2018. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/46393>. Acesso em: 20 jul. 2019.

FUKA, D. R.; WALTER, M. T.; MACALISTER, C.; DEGAETANO, A. T.; STEENHUIS, T. S.; EASTON, Z. M. Using the climate forecast system reanalysis as weather input data for watershed models. **Hydrological Processes**, Hoboken, v. 28, i. 22, p. 5613-5623, oct., 2014. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/hyp.10073>. Acesso em: 05 jul. 2019.

GOLDING, B. W. Quantitative precipitation forecasting in the UK. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 239, i. 1-4, p. 286-305, dec. 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169400003541>. Acesso em: 05 maio 2019.

GREUELL, W.; FRANSSEN, W. H. P.; HUTJES, R. W. A. Seasonal streamflow forecasts for Europe – Part 2: Sources of skill. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 23, i. 1, p. 371-391, jan. 2019. Disponível em: <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/23/371/2019/>. Acesso em: 16 jul. 2019.

HARTMANN, H.; SNOW, J. A.; SU, B.; JIANG, T. Seasonal predictions of precipitation in the Aksu-Tarim River basin for improved water resources management. **Global and Planetary Change**, Amsterdam, v. 147, p. 86-96, dec. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818116302168>. Acesso em: 27 jun. 2019.

HATTERMANN, F. F.; KRYSANOVA, V.; GOSLING, S. N.; DANKERS, R.; DAGGUPATI, P.; DONNELLY, C.; FLÖRKE, M.; HUANG, S.; MOTOVILOV, Y.; BUDA, S.; YANG, T.; MÜLLER, C.; LENG, G.; TANG, Q.; PORTMANN, F. T.; HAGEMANN, S.; GERTEN, D.; WADA, Y.; MASAKI, Y.; ALEMAYEHU, T.; SATOH, Y.; SAMANIEGO, L. Cross-scale intercomparison of climate change impacts simulated by regional and global hydrological models in eleven large river basins. **Climatic Change**, New York City, v. 141, i. 3, p. 561-576, jan. 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-016-1829-4>. Acesso em: 05 jul. 2019.

JONG, P.; TANAJURA, C. A. S.; SÁNCHEZ, A. S.; DARGAVILLE, R.; KIPERSTOK, A.; TORRES, E. A. Hydroelectric production from Brazil's São Francisco River could be ceased due to climate change and inter-annual variability. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 634, p. 1540-1553, sep. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718310143>. Acesso em: 16 out. 2018.

KAUFFELDT, A.; WETTERHALL, F.; PAPPENBERGER, F.; SALAMON, P.; THIELEN, J. Technical review of large-scale hydrological models for implementation in operational flood forecasting schemes on continental level. **Environmental Modelling & Software**, Amsterdam, v. 75, p. 68-76, nov. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815215300529>. Acesso em: 16 out 2018.

KAY, A. L.; RUDD, A. C.; DAVIES, H. N.; KENDON, E. J.; JONES, R. G. Use of very high resolution climate model data for hydrological modelling: baseline performance and future flood changes. **Climatic Change**, New York City, v. 133, i. 2, p. 193-208, nov. 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-015-1455-6>. Acesso em: 29 jun. 2019.

- KIM, S. M.; BENHAM, B. L.; BRANNAN, K. M.; ZECKOSKI, R. W.; DOHERTY, J. Comparison of hydrologic calibration of HSPF using automatic and manual methods. **Water Resources Research**, Hoboken, v. 43, i. 1, p. 1-12, jan. 2007. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006WR004883>. Acesso em: 15 abr. 2019.
- KLEMM, T.; MCPHERSON, R. A. The development of seasonal climate forecasting for agricultural producers. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 232, p. 384-399, jan. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192316303847>. Acesso em: 27 jun. 2019.
- KUWAJIMA, J. I.; FAN, F. M.; SCHWANENBERG, D.; REIS, A. A.; NIEMANN, A.; MAUAD, F. F. Climate change, water-related disasters, flood control and rainfall forecasting: a case study in river São Francisco, Brazil. **Geological Society of London**, London, v. 488, p. 1-29, apr. 2019. Disponível em: <https://sp.lyellcollection.org/content/early/2019/04/04/SP488-2018-128>. Acesso em: 06 maio 2019.
- LATINOVIĆ, D.; CHOU, S. C.; RANCIC, M.; MEDEIROS, G. S.; LYRA, A. A. Seasonal climate and the onset of the rainy season in western-central Brazil simulated by Global Eta Framework model. **International Journal of Climatology**, Hoboken, v. 39, i. 3, p. 1429-1445, mar. 2019. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.5892>. Acesso em: 17 maio 2019.
- LIANG, Z.; TANG, T.; LI, B.; LIU, T.; WANG, J.; HU, Y. Long-term streamflow forecasting using SWAT through the integration of the random forests precipitation generator: case study of Danjiangkou Reservoir. **Hydrology Research**, London, v. 49, i. 5, p. 1513-1527, nov. 2017. Disponível em: <https://iwaponline.com/hr/article-abstract/49/5/1513/38867/Long-term-streamflow-forecasting-using-SWAT>. Acesso em: 20 dez. 2018.
- LLOPART, M.; ROCHA, R. P.; REBOITA, M.; CUADRA, S. Sensitivity of simulated South America climate to the land surface schemes in RegCM4. **Climate Dynamics**, New York City, v. 49, i. 11-12, p. 3975-3987, dec. 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-017-3557-5>. Acesso em: 17 maio 2019.
- MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; TORRES, R. R.; CHAN, C. S.; LYRA, A. Base para modelagem de mudanças climáticas. In: LIMA, J. W. M.; COLLISCHONN, W.; MARENGO, J. A. (orgs.) **Efeito das mudanças climáticas na geração de energia elétrica**. 1 ed. São Paulo: AES Tietê, 2014. p. 23-64.
- MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R.; SANTOS, D. C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. **Climate Dynamics**, New York City, v. 38, i. 9-10, p. 1829-1848, may 2012. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-011-1155-5>. Acesso em: 17 maio 2019.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; SELUCHI, M. E.; CUARTAS, A.; ALVES, L. M.; MENDIONDO, E. M.; OBREGÓN, G.; SAMPAIO, G. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, São Paulo, n. 106, p. 31-44, jul./ago./set. 2015. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/110101>. Acesso em: 15 out. 2018.

MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; NOBRE, C. A. Climate change and water resources. *In*: BICUDO, C. E. M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. (eds.). **Waters of Brazil**. 1 ed. Switzerland: Springer, 2017. p. 171-186.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, New York City, v. 129, i. 3-4, p. 1189-1200, aug. 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-016-1840-8>. Acesso em: 16 out. 2018.

MARINHO FILHO, G. M.; ANDRADE, R. S.; ZUKOWSKI, J. C.; MAGALHÃES, L. L. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 6, n. 2, p. 35-47, jul. 2012. Disponível em: <https://revistas.unilasalle.edu.br/index.php/Rbca/article/view/268>. Acesso em: 07 abr. 2019.

MATOS, A. B.; PEDROLLO, O. C.; CASTRO, N. M. R. Efeito do controle de montante de sub-bacias embutidas na previsão hidrológica de curto prazo com redes neurais: aplicação à bacia de ponte mística. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 87-99, jan./mar. 2014. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=161&SUMARIO=4354>. Acesso em: 10 dez. 2018.

MELLER, A.; COLLISCHONN, W.; FAN, F.; BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C. D.; DIAS, P. L. S. e MOREIRA, D. S. Previsão de cheias por conjunto em curto prazo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 19, n. 3, p. 33-49, jul./set. 2014. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=168&SUMARIO=4781>. Acesso em: 12 maio 2019.

MESINGER, F.; VELJOVIC, K.; CHOU, S. C.; GOMES, J.; LYRA, A. The Eta model: design, use, and added value. *In*: HROMADKA II, T. V. (ed.) **Topics in climate modeling**. 1. ed. London: IntechOpen, 2016. p. 137-156. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/topics-in-climate-modeling/the-eta-model-design-use-and-added-value>. Acesso em: 17 maio 2019.

MIZUKAMI, N.; CLARK, M. P.; GUTMANN, E. D.; MENDOZA, P. A.; NEWMAN, A. J.; NIJSSEN, B.; LIVNEH, B.; HAY, L. E.; ARNOLD, J. R.; BREKKE, L. D. Implications of the methodological choices for hydrologic portrayals of climate change over the contiguous United States: Statistically downscaled forcing data and hydrologic models. **Journal of Hydrometeorology**, Washington, v. 17, i. 1, p. 73-98, jan. 2016. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JHM-D-14-0187.1>. Acesso em: 05 jul. 2019.

MULETA, M. K.; NICKLOW, J. W. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 306, i. 1-4, p. 127-145, may 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002216940400424X>. Acesso em: 15 abr. 2019.

NAJAFI, M. R.; MORADKHANI, H. Ensemble combination of seasonal streamflow forecasts. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 21, i. 1, p. 1-13, jan. 2016. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0001250>. Acesso em: 17 jul. 2019.

NEARING, G. S.; GUPTA, H. V. The quantity and quality of information in hydrologic models. **Water Resources Research**, Washington, v. 51, p. 524-538, jan. 2015. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014WR015895>. Acesso em: 07 abr. 2019.

NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A.; SELUCHI, M. E.; CUARTAS, L. A.; ALVES, L. M. Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection**, Wuhan, v. 8, i. 2, p. 252-262, feb. 2016. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=63776>. Acesso em: 04 dez. 2019.

PILOTTO, I. L.; CHOU, S. C.; NOBRE, P. Seasonal climate hindcasts with Eta model nested in CPTEC coupled ocean-atmosphere general circulation model. **Theoretical and Applied Climatology**, New York City, v. 110, i. 3, p. 437-456, dec. 2012. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-012-0633-y>. Acesso em: 17 maio 2019.

PILZ, T.; DELGADO, J. M.; VOSS, S.; VORMOOR, K.; FRANCKE, T.; COSTA, A. C.; MARTINS, E.; BRONSTERT, A. Seasonal drought prediction for semiarid northeast Brazil: what is the added value of a process-based hydrological model? **Hidrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 23, i. 4, p. 1951-1971, apr. 2019. Disponível em: <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/23/1951/2019/>. Acesso em: 20 jul. 2019.

PONTES, P. R. M.; FAN, F. M.; FLEISCHMANN, A. S.; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. A.; JARDIM, P. F.; SORRIBAS, M. V.; COLLISCHONN, W. MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. **Environmental Modelling & Software**, Amsterdam, v. 94, p. 1-20, aug. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136481521630189X>. Acesso em: 02 maio 2019.

RASMUSSEN, E. M.; DICKINSON, R. E.; KUTZBACH, J. E.; CLEAVELAND, M. K. Climatology. In: MAIDMENT, D. R. (ed.) **Handbook of Hydrology**. 1 ed. New York City: McGraw-Hill Education, 1993.

REBOITA, M. S.; DIAS, C. G.; DUTRA, L. M. M.; ROCHA, R. P.; LLOPART, M. Previsão climática sazonal para o Brasil obtida através de modelos climáticos globais e regional. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 33, n. 2, p. 207-224, abr./jun. 2018. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862018000200207. Acesso em: 15 jun. 2019.

RESENDE, N.; CHOU, S. C. Influência das condições do solo na climatologia da previsão sazonal do modelo Eta. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 15, p. 64-79, jul./dez. 2014. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/37366>. Acesso em: 17 maio 2019.

SAHU, N.; ROBERTSON, A. W.; BOER, R.; BEHERA, S.; DEWITT, D. G.; TAKARA, K.; KUMAR, M.; SINGH, R. B. Probabilistic seasonal streamflow forecasts of the Citarum River, Indonesia, based on general circulation models. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, Berlin, v. 31, p. 1747-1758, aug. 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00477-016-1297-4>. Acesso em: 13 mar. 2020.

SCHWANENBERG, D.; FAN, F. M.; NAUMANN, S.; KUWAJIMA, J. I.; MONTERO, R. A.; REIS, A. A. Short-term reservoir optimization for flood mitigation under meteorological and hydrological forecast uncertainty: application to the Três Marias reservoir in Brazil. **Water Resources Management**, New York City, v. 29, i. 5, p. 1635-1651, mar. 2015. Disponível em: <https://link-springer-com.ez38.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s11269-014-0899-1>. Acesso em: 10 dez. 2018.

SELUCHI, M.; BEU, C. ANDRADE, K. M. Características das frentes frias causadoras de chuvas intensas no leste de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 25-37, jan./mar. 2017. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862017000100025. Acesso em: 17 maio 2019.

SHARMA, S.; SIDDIQUE, R.; REED, S.; AHNERT, P.; MEJIA, A. Hydrological model diversity enhances streamflow forecast skill at short- to medium-range timescales. **Water Resources Research**, Washington, v. 55, i. 2, p. 1510-1530, feb. 2019. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018WR023197>. Acesso em: 12 jul. 2019.

SILVA, B. C. **Previsão hidroclimática de vazão para a bacia do rio São Francisco**. 2005. 272 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

SILVA, B. C.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; CORBO, M. D. Previsão hidroclimática de vazão de curto prazo na bacia do rio São Francisco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 31-41, jul./set. 2007. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=18&SUMARIO=230>. Acesso em: 16 out. 2018.

SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M.; COLLISCHONN, W. Previsão de vazão com modelos hidroclimáticos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 11, n. 3, p. 15-29, jul./set., 2006. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=23&SUMARIO=385>. Acesso em: 10 dez. 2018.

SILVEIRA, C. S.; FILHO, F. A. S.; MARTINS, E. S. P. R.; OLIVEIRA, J. L.; COSTA, A. C.; NOBREGA, M. T.; SOUZA; S. A.; SILVA; R. F. V. Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 416-428, abr./jun. 2016. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=190&SUMARIO=5195>. Acesso em: 16 out. 2018.

SINGH, S. K. Long-term streamflow forecasting based on ensemble streamflow prediction technique: a case study in New Zealand. **Water Resources Management**, New York City, v. 30, i. 7, p. 2295-2309, mar. 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-016-1289-7>. Acesso em: 17 jul. 2019.

SIQUEIRA, V. A.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; CHOU, S. C. Ensemble flood forecasting based on operational forecasts of the regional Eta EPS in the Taquari-Antas basin. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, i. 3, p. 587-602, july/set., 2016b. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=192&SUMARIO=5216>. Acesso em: 17 dez. 2018.

SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A.; JARDIM, P. F.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. IPH-Hydro Tools: uma ferramenta open source para determinação de informações topológicas em bacias hidrográficas integrada a um ambiente SIG. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 274-287, jan./mar. 2016a. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=188&SUMARIO=5166>. Acesso em: 29 abr. 2019.

SOARES, M. B.; DALY, M.; DESSAI, S. Assessing the value of seasonal climate forecasts for decision-making. **WIREs Climate Change**, Hoboken, v. 9, i. 4, p. 1-19, july/aug. 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wcc.523>. Acesso em: 28 jun. 2019.

SOUZA FILHO, F. A.; LALL, U. Modelo de previsão de vazões sazonais e interanuais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 9, n. 2, p. 61-74, abr./jun. 2004. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=32&SUMARIO=502>. Acesso em: 17 dez. 2018.

TAYE, M. T.; WILLEMS, P.; BLOCK, P. Implications of climate change on hydrological extremes in the Blue Nile basin: a review. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, Amsterdam, v. 4, p. 280-293, july 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581815000828>. Acesso em: 16 out. 2018.

VIEIRA, R. M. G.; DEREZYNSKI, C. P.; CHOU, S. C.; GOMES, J. L.; NETO, A. C. P. Avaliação das previsões de precipitação do modelo Eta para bacia do rio São Francisco em Minas Gerais, Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 38, n. 2, p. 15-23, dez. 2015. Disponível em:

<http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/anigeo/article/view/7521>. Acesso em: 17 maio 2019.

WEBER, T. M.; DEREZYNSKI, C. P.; SOUZA, R. H. S.; CHOU, S. C.; BUSTAMANTE, J. F.; PAIVA NETO, A. C. Investigação da previsibilidade sazonal da precipitação na região do Alto São Francisco em Minas Gerais. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 38, n. 2, p. 24-36, dez. 2015. Disponível em:

<https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/6982>. Acesso em: 20 jun. 2019.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2 ed. Cambridge: Elsevier Academic Press, 2006.

WOLDEMESKEL, F.; MCINERNEY, D.; LERAT, J.; THYER, M.; KAVETSKI, D.; SHIN, D.; TUTEJA, N.; KUCZERA, G. Evaluating post-processing approaches for monthly and seasonal streamflow forecasts. **Hidrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 22, i. 12, p. 6257-6278, dec. 2018. Disponível em: <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/22/6257/2018/>. Acesso em: 20 jul. 2019.

YNOUE, R. Y.; AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; SILVA, G. A. M. **Meteorologia: noções básicas**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

YOSSEF, N. C.; BEEK, R. V.; WEERTS, A.; WINSEMIUS, H.; BIERKENS, M. F. P. Skill of a global forecasting system in seasonal ensemble streamflow prediction. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 21, i. 8, p. 4103-4114, aug. 2017. Disponível em: <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/21/4103/2017/hess-21-4103-2017.html>. Acesso em: 10 maio 2019.

YUAN, X. An experimental seasonal hydrological forecasting system over the Yellow River basin – Part 2: The added value from climate forecast models. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 20, i. 6, p. 2453-2466, june 2016. Disponível em: <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/20/2453/2016/>. Acesso em: 06 jun. 2019.

YUAN, X.; WOOD, E. F.; MA, Z. A review on climate-model-based seasonal hydrologic forecasting: physical understanding and system development. **WIREs Water**, Hoboken, v. 2, i. 5, p. 523-536, sep./oct. 2015. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wat2.1088>. Acesso em: 06 jun. 2019.

ZHAO, T.; SCHEPEN, A.; WANG, Q. J. Ensemble forecasting of sub-seasonal to seasonal streamflow by a Bayesian joint probability modelling approach. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 541, p. 839-849, oct. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002216941630470X>. Acesso em: 17 jul. 2019.

APÊNDICE A

Nas tabelas a seguir são apresentados os valores dos parâmetros do modelo hidrológico MGB-IPH obtidos para cada sub bacia do rio São Francisco após realizada a calibração, em que: Wm representa a capacidade de armazenamento do solo; b é a forma da relação entre armazenamento e saturação; Kbas é a vazão durante a estiagem; Kint é a quantidade de água que escoar subsuperficialmente; XL é a forma da curva de redução da drenagem intermediária; CAP é o fluxo do reservatório subterrâneo para camada superficial; Wc é o armazenamento residual; CS é a calibração da propagação subsuperficial; CI é a calibração da propagação superficial; CB é o retardo do reservatório subterrâneo; e QBé a vazão de base.

SUB BACIA 1

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	117.68	0.81	0.03	10.57	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	1074.67	0.16	1.19	21.15	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	479	0.25	0.8	17.62	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	528.69	0.25	1.19	21.15	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	325.24	0.48	0.5	10.57	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	1719.97	0.16	1.19	21.15	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	697.6	0.48	1.11	10.57	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	571.68	0.65	0.5	10.57	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	291.1	0.81	0.3	10.57	0.67	0	0.05
Água	0	0.1	0.8	46.17	0.67	0.5	0.5
CS	39.42						
CI	208.68						
CB	4800						
QB_M3/SKM2	0.01						

SUB BACIA 2

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	135.03	0.6	0.02	5.47	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	1755.47	0.12	1.17	14.6	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	750.5	0.18	0.78	9.12	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	836.49	0.24	1.17	14.6	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	428.56	0.36	0.62	9.12	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	2282.86	0.24	1.17	14.6	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	827.66	0.36	0.62	9.12	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	469.09	0.48	0.39	5.47	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	243.61	0.6	0.23	5.47	0.67	0	0.05
Água	0	0.1	0.8	30	0.67	0.5	0.5
CS	37.92						
CI	47.19						
CB	6300						
QB_M3/SKM2	0.01						

SUB BACIA 3

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	126.2	0.91	0.04	23.7	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	1379	0.18	1.91	63.2	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	910.8	0.27	1.28	39.5	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	1043	0.36	1.91	63.2	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	453.5	0.54	1.02	39.5	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	1999	0.36	1.91	63.2	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	1025.6	0.54	1.02	39.5	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	498.5	0.72	0.64	23.7	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	303	0.91	0.38	23.7	0.67	0	0.05
Água	0	0.1	0.8	30	0.67	0.5	0.5
CS	39.96						
CI	100.2						
CB	3600						
QB_M3/SKM2	0.01						

SUB BACIA 4

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	167.72	1.51	0.02	16.23	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	1547.24	0.3	0.97	33.29	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	1274.21	0.45	0.65	27.06	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	1500	0.6	0.67	33.29	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	500	0.9	0.52	27.06	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	3500	0.6	0.67	33.29	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	1000	0.9	0.52	27.06	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	499.5	1.2	0.33	16.23	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	302.09	1.51	0.19	16.23	0.67	0	0.05
Água	0	0.1	0.8	30	0.67	0.5	0.5
CS	20.7						
CI	125.75						
CB	4000						
QB_M3/SKM2	0.01						

SUB BACIA 5

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	74.08	0.91	0.06	7.51	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	744.66	0.18	2.98	20.03	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	445.38	0.27	2	12.52	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	288.91	0.36	2.98	20.03	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	317.45	0.54	1.59	12.52	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	1421.29	0.36	2.98	20.03	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	113.84	0.54	1.59	12.52	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	785.64	0.72	1	7.51	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	216.95	0.91	0.59	7.51	0.67	0	0.05
Água	0	0.1	0.8	30	0.67	0.5	0.5
CS	7.99						
CI	110.72						
CB	4000						
QB_M3/SKM2	0.01						

SUB BACIA 6

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	231.32	0.9	0.04	20.12	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	2719.39	0.18	1.72	53.66	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	989.13	0.27	1.15	33.54	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	846.92	0.36	1.72	53.66	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	473.91	0.54	0.92	33.54	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	2476.76	0.36	1.72	53.66	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	1071.75	0.54	0.92	33.54	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	509.97	0.71	0.58	20.12	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	279.37	0.9	0.34	20.12	0.67	0	0.05
Água	0	0.1	0.8	30	0.67	0.5	0.5
CS	28.57						
CI	102.71						
CB	5700						
QB_M3/SKM2	0.01						

SUB BACIA 7

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	155.1	1.29	0.03	30.43	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	1470.01	0.26	1.47	81.15	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	853.42	0.38	0.98	50.72	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	766.61	0.51	1.47	81.15	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	261.67	0.77	0.78	50.72	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	1771.11	0.51	1.47	81.15	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	533.31	0.77	0.78	50.72	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	504.98	1.02	0.49	30.43	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	286.34	1.29	0.29	30.43	0.67	0	0.05
Água	0	0.1	0.8	30	0.67	0.5	0.5
CS	28.05						
CI	99.2						
CB	3400						
QB_M3/SKM2	0.01						

SUB BACIA 8

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	155.1	1.29	0.03	30.43	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	1470.01	0.26	0.7	51.15	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	1853.42	0.38	0.7	30.72	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	2500	0.51	0.7	51.15	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	1200	0.77	0.28	20.72	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	3000.11	0.51	0.7	51.15	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	1533.31	0.77	0.28	20.72	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	504.98	1.02	0.49	30.43	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	286.34	1.29	0.29	30.43	0.67	0	0.05
Água	0	0.1	0.8	30	0.67	0.5	0.5
CS	20.05						
CI	99.2						
CB	4000						
QB_M3/SKM2	0.01						

SUB BACIA 9

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	456.46	0.88	0.04	25.75	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	1161.92	0.18	1.56	68.7	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	968.34	0.26	1.04	42.94	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	1354.39	0.35	1.56	68.7	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	321.5	0.53	0.84	42.94	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	1755.19	0.35	1.56	68.7	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	288.18	0.53	0.84	42.94	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	709.32	0.69	0.52	25.75	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	818.58	0.88	0.31	25.75	0.67	0	0.05
Água	0	0.1	0.8	30	0.67	0.5	0.5
CS	29.84						
CI	105.28						
CB	3000						
QB_M3/SKM2	0.01						

SUB BACIA 10

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	308.35	0.63	0.02	34.1	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	2088.49	0.13	1.04	90.95	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	872.41	0.19	0.69	56.85	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	1954.04	0.25	1.04	90.95	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	376.76	0.38	0.55	56.85	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	2595.64	0.25	1.04	90.95	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	689.14	0.38	0.55	56.85	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	513.54	0.5	0.35	34.1	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	289.15	0.63	0.21	34.1	0.67	0	0.05
Água	0	0.1	0.8	30	0.67	0.5	0.5
CS	56.14						
CI	70.07						
CB	3900						
QB_M3/SKM2	0.005						

SUB BACIA 11

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	241.62	1.49	0.05	49.72	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	2411.03	0.3	2.11	132.62	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	1269.19	0.44	1.41	82.9	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	561.96	0.59	2.11	132.62	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	140	0.9	1.14	82.9	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	1382.96	0.59	2.11	132.62	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	1038.45	0.9	1.14	82.9	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	518.65	1.17	0.71	49.72	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	283.95	1.49	0.42	49.72	0.67	0	0.05
Água	0	0.1	0.8	30	0.67	0.5	0.5
CS	16.06						
CI	58.92						
CB	3900						
QB_M3/SKM2	0.01						

SUB BACIA 12

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	450.13	0.81	0.04	18.56	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	1450.02	0.16	1.61	49.49	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	238.14	0.24	1.07	30.94	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	881.1	0.33	1.61	49.49	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	208.5	0.49	0.87	30.94	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	2543.62	0.33	1.61	49.49	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	1148.4	0.49	0.87	30.94	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	369.28	0.63	0.54	18.56	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	351.16	0.81	0.32	18.56	0.67	0	0.05
Água	0	0.1	0.8	30	0.67	0.5	0.5
CS	24.68						
CI	104.49						
CB	2000						
QB_M3/SKM2	0.01						

SUB BACIA 13

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	155.1	1.29	0.03	30.43	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	1470.01	0.26	0.7	51.15	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	1853.42	0.38	0.7	30.72	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	2500	0.51	0.7	51.15	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	1200	0.77	0.28	20.72	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	3000.11	0.51	0.7	51.15	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	1533.31	0.77	0.28	20.72	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	504.98	1.02	0.49	30.43	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	286.34	1.29	0.29	30.43	0.67	0	0.05
Água	0	0.1	0.8	30	0.67	0.5	0.5
CS	20.05						
CI	99.2						
CB	4000						
QB_M3/SKM2	0.01						

SUB BACIA 14

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	659.64	0.1	0.01	8.59	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	536.87	0.1	0.01	28.69	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	1071.76	0.06	0.01	8.59	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	1557.17	0.01	0.01	28.69	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	456.58	0.09	0.01	8.59	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	4516.3	0.01	0.01	28.69	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	2405.44	0.09	0.01	8.59	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	532.46	0.01	0.01	20.06	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	1305.71	0.09	0.01	8.59	0.67	0	0.05
Água	0	0.02	0.04	2.57	0.67	0.5	0.5
CS	88.19						
CI	39.22						
CB	1100						
QB_M3/SKM2	0.005						

SUB BACIA 15

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	858.87	0.71	1.44	28.62	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	2480.54	0.14	1.44	28.62	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	1524.88	0.21	3.28	45.05	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	2097.47	0.28	3.28	45.05	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	168.63	0.43	1.44	28.62	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	2838.65	0.28	3.28	45.05	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	265.36	0.43	1.44	28.62	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	876.25	0.56	2.35	28.62	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	564.7	0.71	1.44	25.88	0.67	0	0.05
Água	0	0.33	1.56	22.68	0.67	0.5	0.5
CS	40.41						
CI	86.13						
CB	7500						
QB_M3/SKM2	0.006						

SUB BACIA 16

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	248.17	0.07	0.04	2.57	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	3314	0.07	0.04	8.58	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	934.4	0.04	0.04	2.57	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	917.6	0.01	0.06	8.58	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	421.2	0.06	0.02	2.57	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	1742.4	0.01	0.06	8.58	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	1102.4	0.06	0.02	2.57	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	589	0.01	0.04	6	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	327	0.06	0.02	2.57	0.67	0	0.05
Água	0	0.02	0.04	2.57	0.67	0.5	0.5
CS	77.16						
CI	83.1						
CB	4000						
QB_M3/SKM2	0.01						

SUB BACIA 17

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	346.41	0.4	0.11	11.97	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	2642.74	0.08	2.52	20.12	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	1168.21	0.12	2.52	12.08	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	2972.65	0.16	2.52	20.12	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	1143.61	0.25	1.01	8.15	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	5113.97	0.16	2.52	20.12	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	1118.54	0.25	1.01	8.15	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	818.48	0.32	1.76	11.97	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	427.11	0.4	1.05	11.97	0.67	0	0.05
Água	0	0.1	0.8	30	0.67	0.5	0.5
CS	32.89						
CI	83.13						
CB	7500						
QB_M3/SKM2	0.002						

SUB BACIA 18

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	2400	0.12	0.01	0.5	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	3366	0.12	0.01	0.5	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	3733	0.12	0.01	0.5	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	3530	0.12	0.01	0.5	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	1404	0.12	0.01	0.5	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	3431	0.12	0.01	0.5	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	1478	0.12	0.01	0.5	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	2090	0.12	0.01	0.5	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	571	0.12	0.01	0.5	0.67	0	0.05
Água	0	0.12	0.01	0.5	0.67	0.5	0.5
CS	174.7						
CI	994						
CB	4000						
QB_M3/SKM2	0.002						

SUB BACIA 19

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	1121.2	0.16	0.69	13.87	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	2248.28	0.04	0.69	13.87	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	1602.74	0.06	1.43	33.01	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	5531.09	0.09	1.43	33.01	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	404.86	0.16	0.69	13.87	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	4054.56	0.09	1.43	33.01	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	723.65	0.16	0.69	13.87	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	2151.31	0.16	1.3	23.44	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	1173.38	0.2	0.69	13.87	0.67	0	0.05
Água	0	0.18	1.56	22.68	0.67	0.5	0.5
CS	68.02						
CI	204.48						
CB	18200						
QB_M3/SKM2	0.002						

SUB BACIA 20

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	798.23	0.09	0.63	5.92	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	1815.44	0.03	0.63	5.92	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	1803.5	0.03	1.29	14.09	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	6032.07	0.05	1.29	14.09	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	827.83	0.09	0.63	5.92	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	4314.94	0.05	1.29	14.09	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	1018.51	0.09	0.63	5.92	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	2415.02	0.09	1.17	10.01	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	701.8	0.12	0.63	5.92	0.67	0	0.05
Água	0	0.12	1.56	10.01	0.67	0.5	0.5
CS	90.05						
CI	527.56						
CB	20000						
QB_M3/SKM2	0.002						

SUB BACIA 21

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	1386	0	0.01	2.5	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	3366	0	0.01	2.5	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	3733	0	0.01	2.5	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	2530	0	0.01	2.5	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	404	0	0.01	2.5	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	1431	0	0.01	2.5	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	3278	0	0.01	2.5	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	2590	0	0.01	2.5	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	871	0	0.01	2.5	0.67	0	0.05
Água	0	0	0.01	2.5	0.67	0.5	0.5
CS	174.7						
CI	994						
CB	1500						
QB_M3/SKM2	0.001						

SUB BACIA 22

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	1870	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	7660	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	4954	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	131	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	108	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	1477	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	278	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	391	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	74	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Água	0	0	0.01	3.5	0.67	0.5	0.5
CS	17						
CI	28						
CB	1500						
QB_M3/SKM2	0.001						

SUB BACIA 23

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	1056.55	0	0.01	13.69	0.67	0.00	0.05
Floresta/Reflorestamento	6495.68	0	0.01	13.69	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	4077.14	0	0.01	13.69	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	1275.55	0	0.01	13.69	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	907.31	0	0.01	13.69	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	1070.83	0	0.01	13.69	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	563.51	0	0.01	13.69	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	1556.96	0	0.01	13.69	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	202.39	0	0.01	13.69	0.67	0	0.05
Água	0	0	0.01	3.5	0.67	0.5	0.5
CS	12.63						
CI	112.34						
CB	1500						
QB_M3/SKM2	0.001						

SUB BACIA 24

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	1870	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	7660	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	4954	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	131	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	108	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	1477	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	278	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	391	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	74	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Água	0	0	0.01	3.5	0.67	0.5	0.5
CS	17						
CI	28						
CB	1500						
QB_M3/SKM2	0.01						

SUB BACIA 25

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	1870	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	7660	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	4954	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	131	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	108	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	1477	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	278	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	391	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	74	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Água	0	0	0.01	3.5	0.67	0.5	0.5
CS	17						
CI	28						
CB	1500						
QB_M3/SKM2	0.01						

SUB BACIA 26

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	1870	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	7660	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	4954	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	131	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	108	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	1477	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	278	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	391	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	74	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Água	0	0	0.01	3.5	0.67	0.5	0.5
CS	17						
CI	28						
CB	1500						
QB_M3/SKM2	0.01						

SUB BACIA 27

Tipos e usos do solo	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Rocha	1870	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Floresta/Reflorestamento	7660	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Agricultura irrigada	4954	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo profundo	131	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Agricultura/pastagem + solo litólico	108	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Cerrado + solo profundo	1477	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Cerrado + solo litólico	278	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Caatinga + solo profundo	391	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Caatinga + solo litólico	74	0	0.01	3.5	0.67	0	0.05
Água	0	0	0.01	3.5	0.67	0.5	0.5
CS	17						
CI	28						
CB	1500						
QB_M3/SKM2	0.01						

APÊNDICE B

. A seguir são apresentadas as vazões observadas e previstas obtidas para cada uma das sub bacias por meio da integração dos modelos Eta/MGB, referentes a todo o período de previsão adotado (começando em janeiro de 2001 e terminando em dezembro de 2018) e para cada um dos horizontes de previsão: um, dois, três e quatro meses de antecedência. Têm-se em todos os gráficos que: as linhas em azul representam as vazões observadas; as linhas em cinza claro representam as vazões previstas para cada um dos membros do conjunto de previsões do Eta; e as linhas em preto representam uma média desses valores previstos.

Figura B.1 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Porto das Andorinhas no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

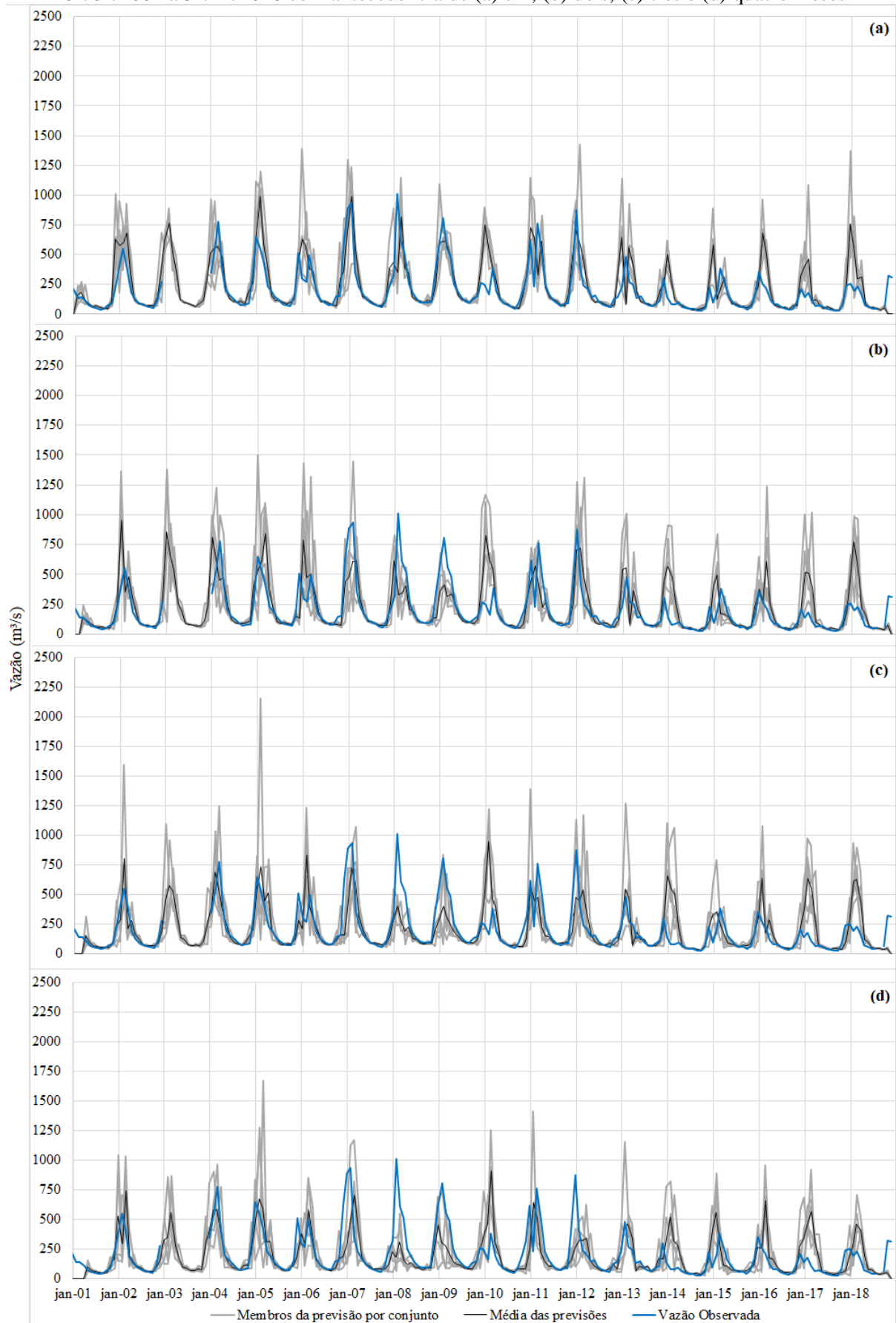


Figura B.2 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Velho da Taipa no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

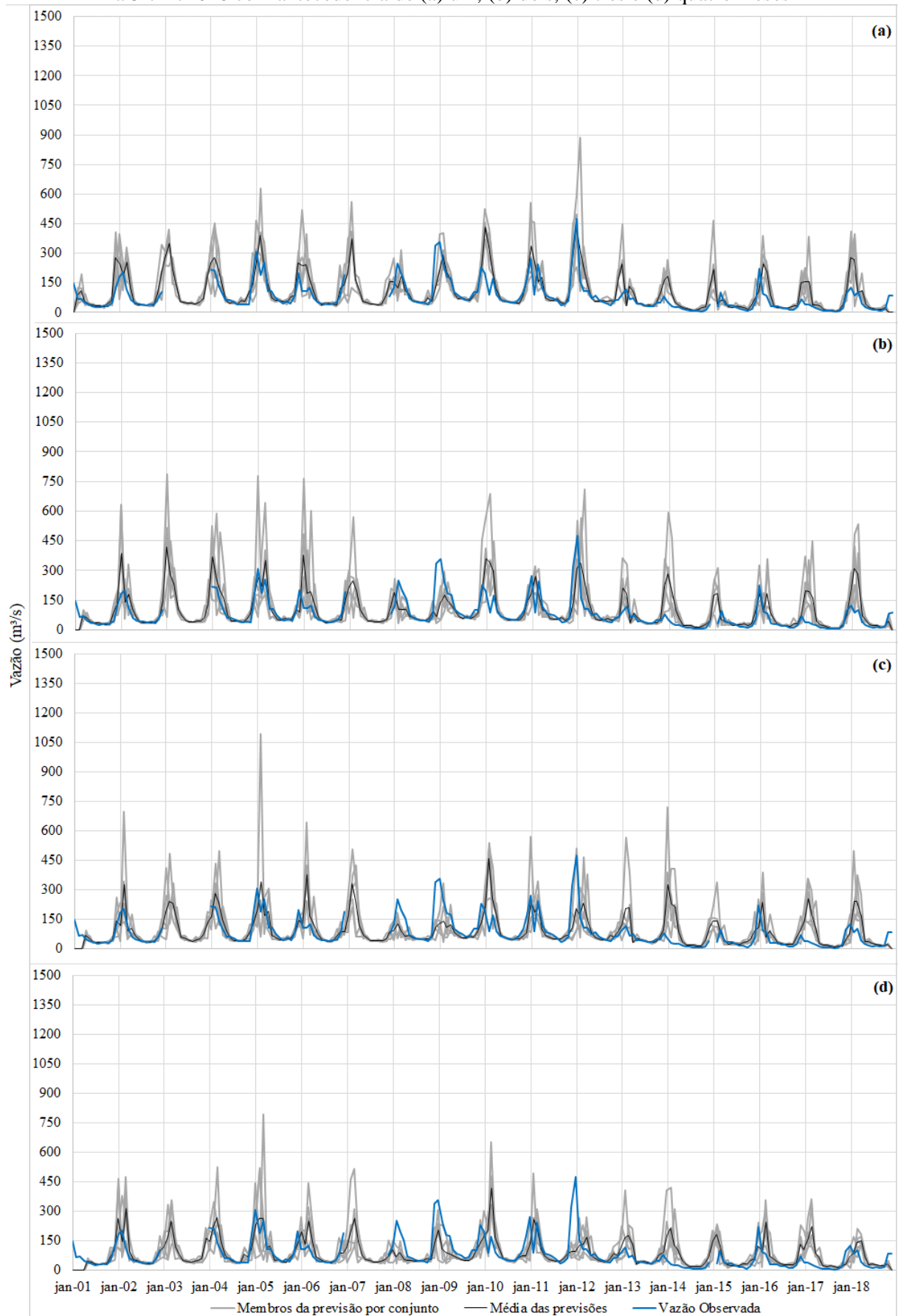


Figura B.3 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Ponte da Taquara no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

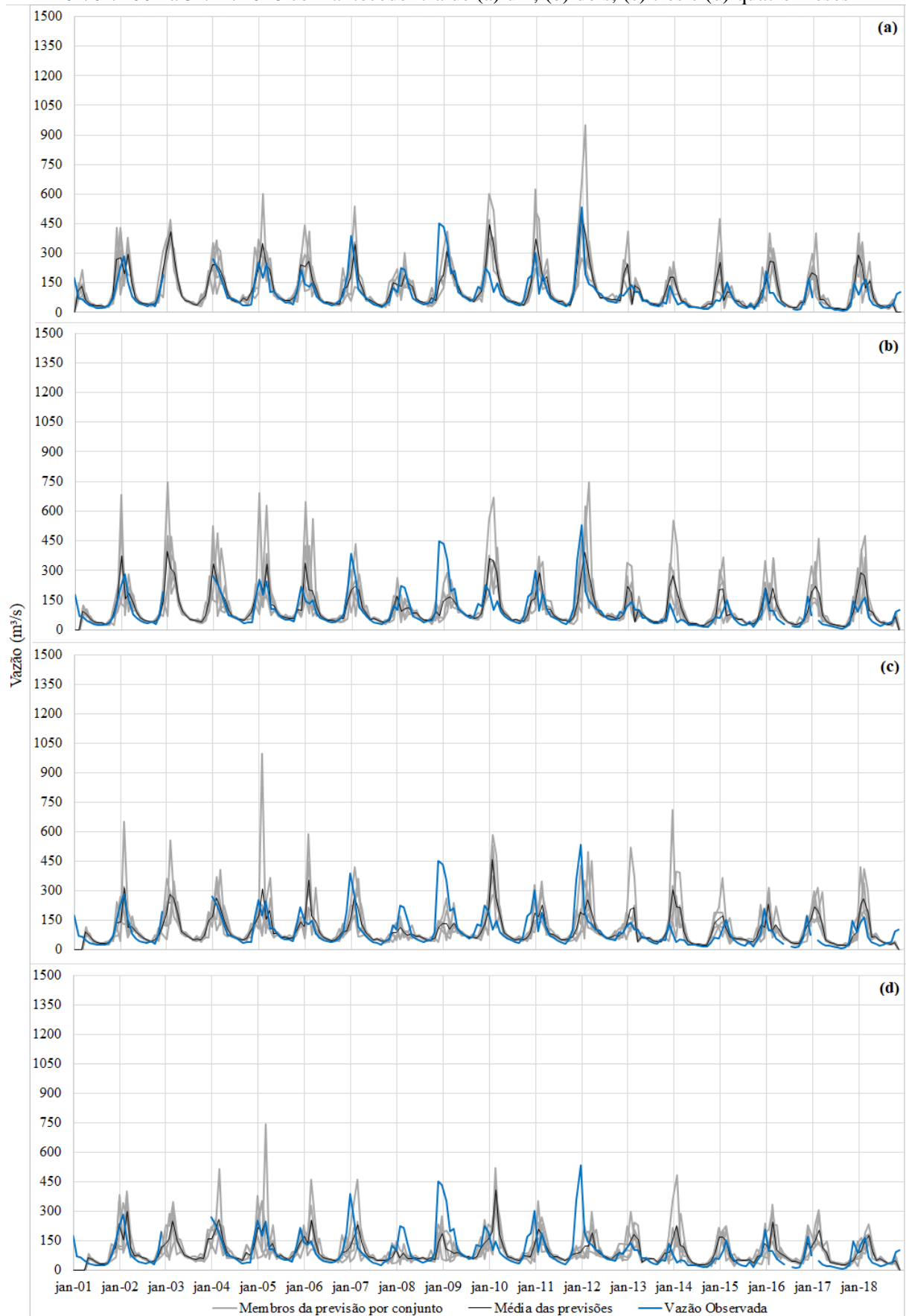


Figura B.4 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Três Marias no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

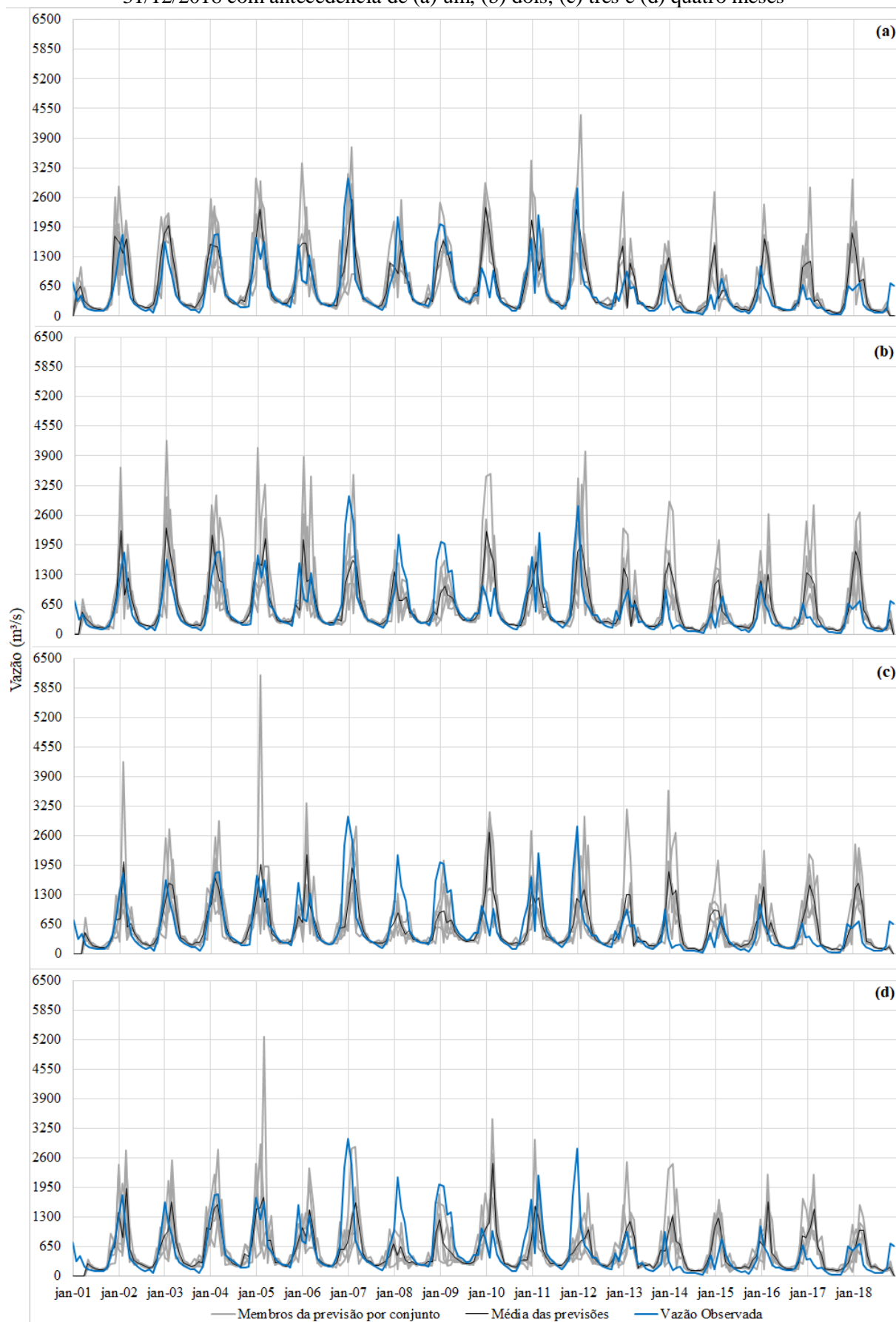


Figura B.5 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Pirapora-Barreiro no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

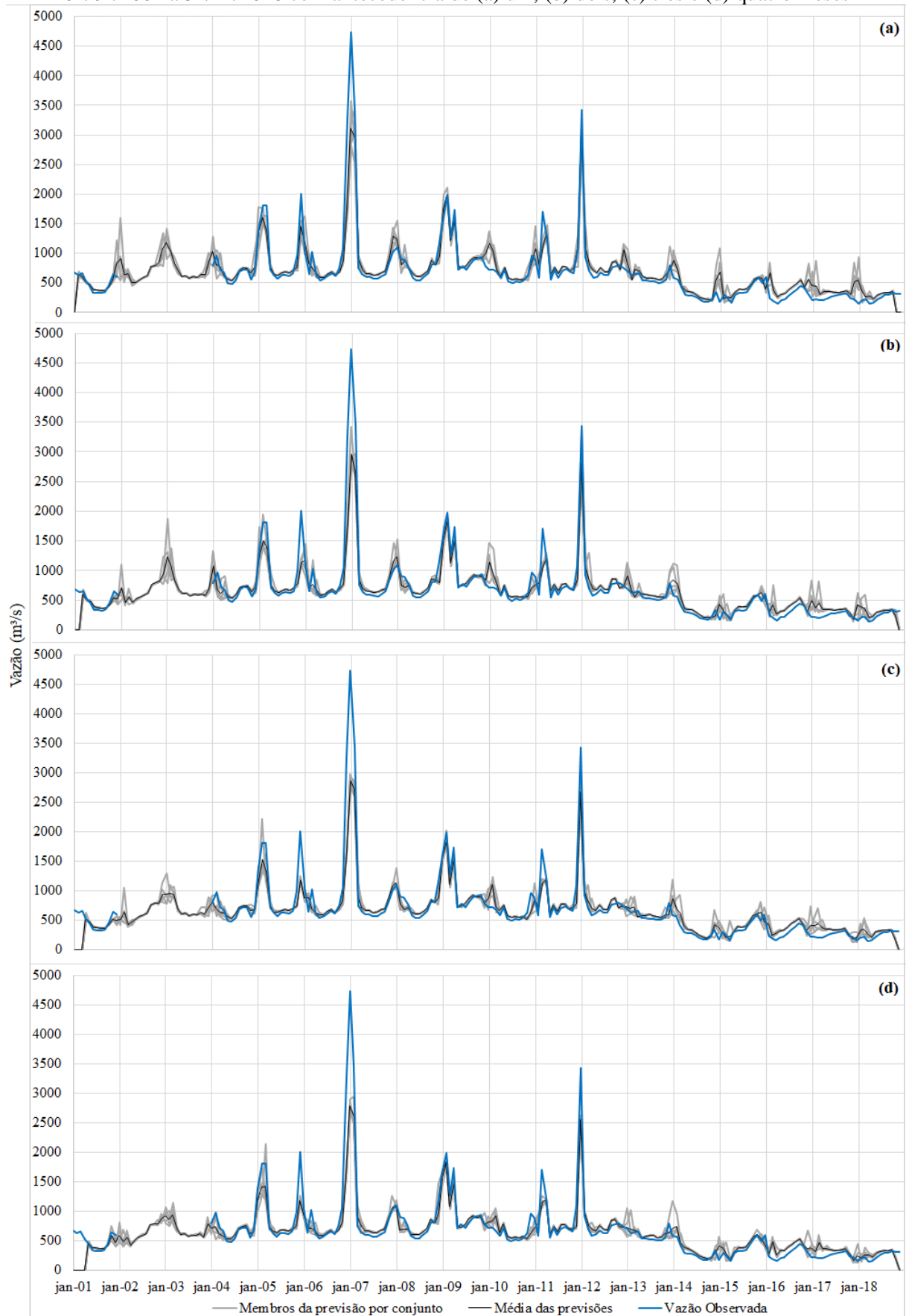


Figura B.6 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Ponte do Licínio-Jusante no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

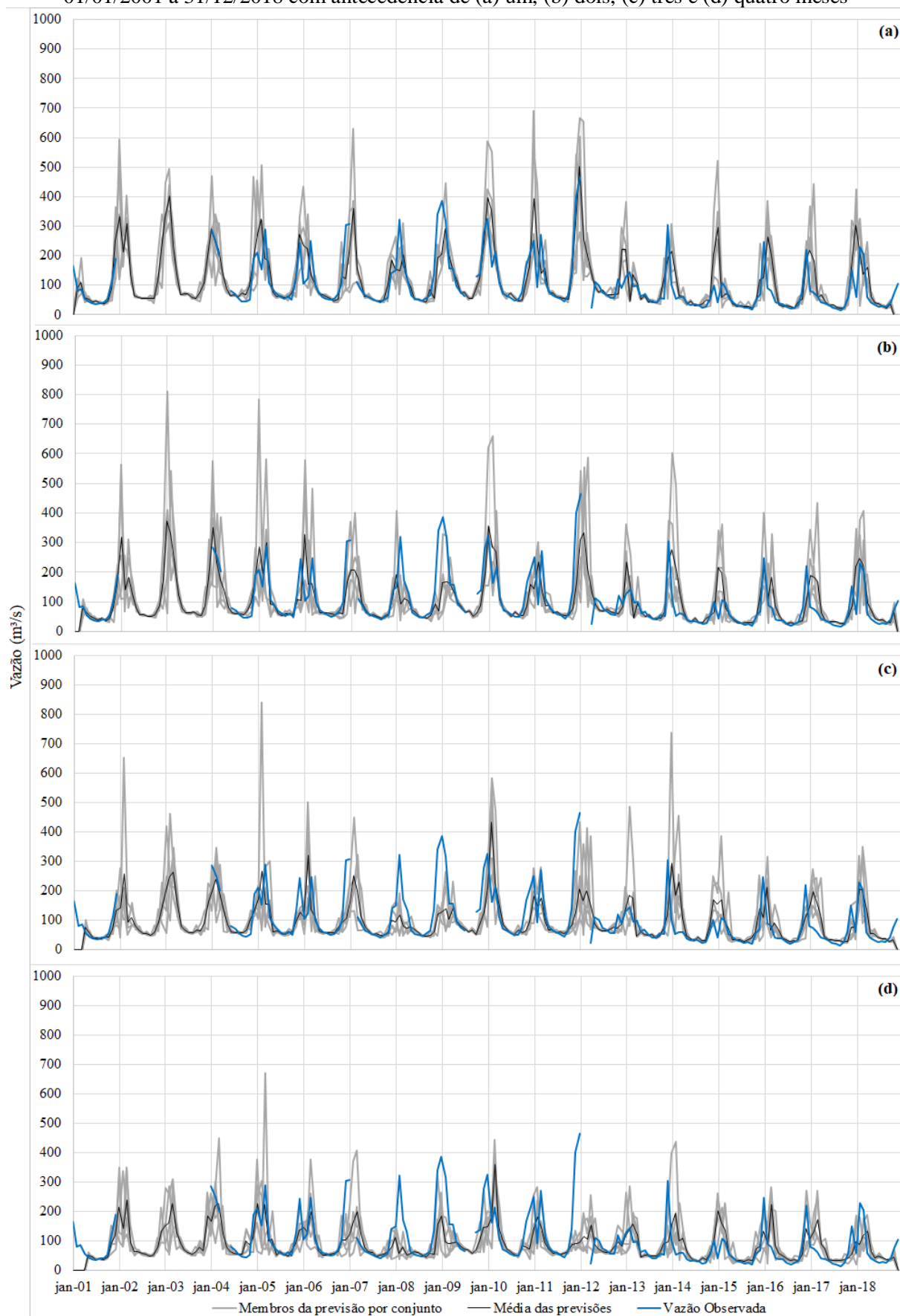


Figura B.7 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Várzea da Palma no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

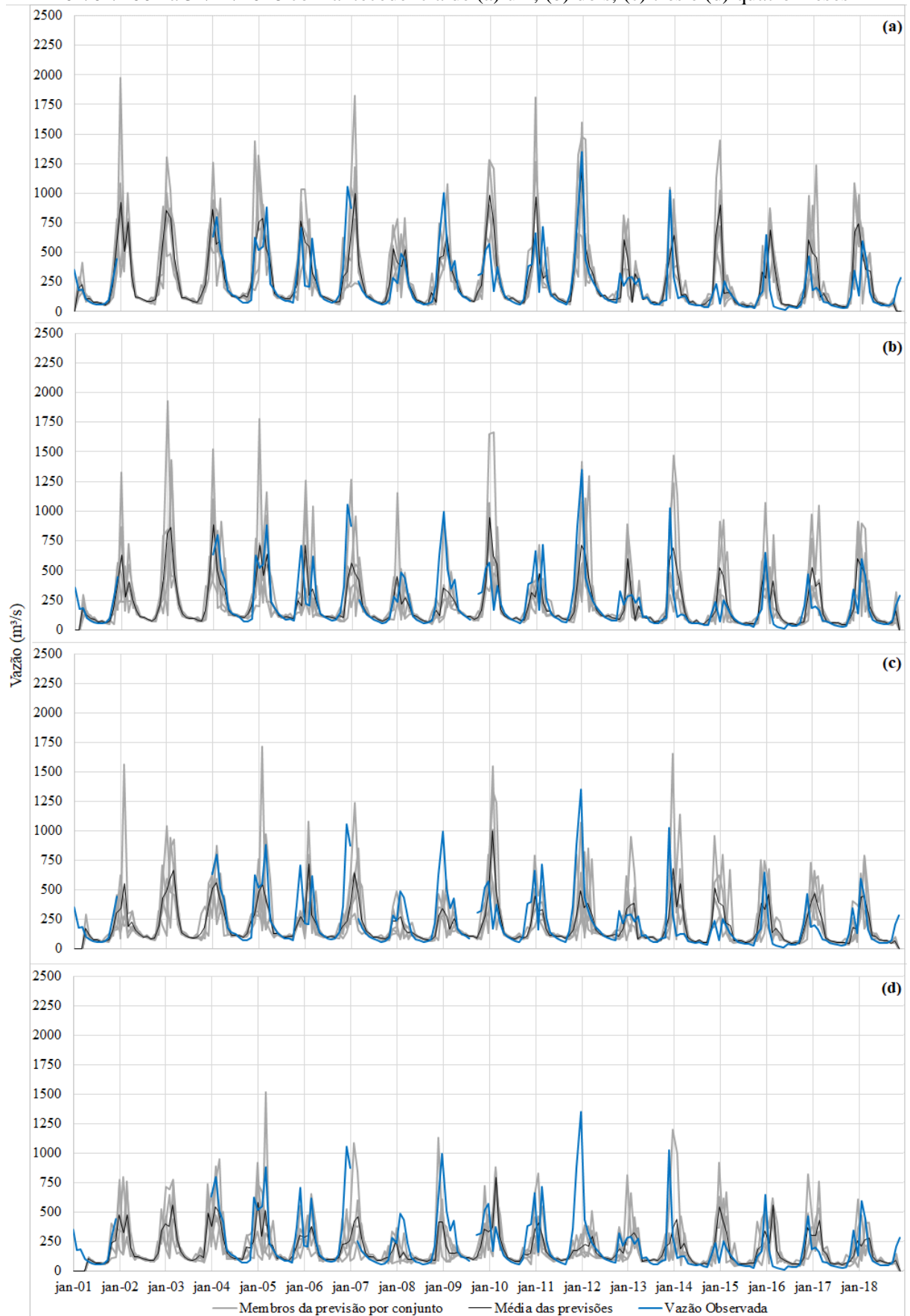


Figura B.8 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Cachoeira da Manteiga no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

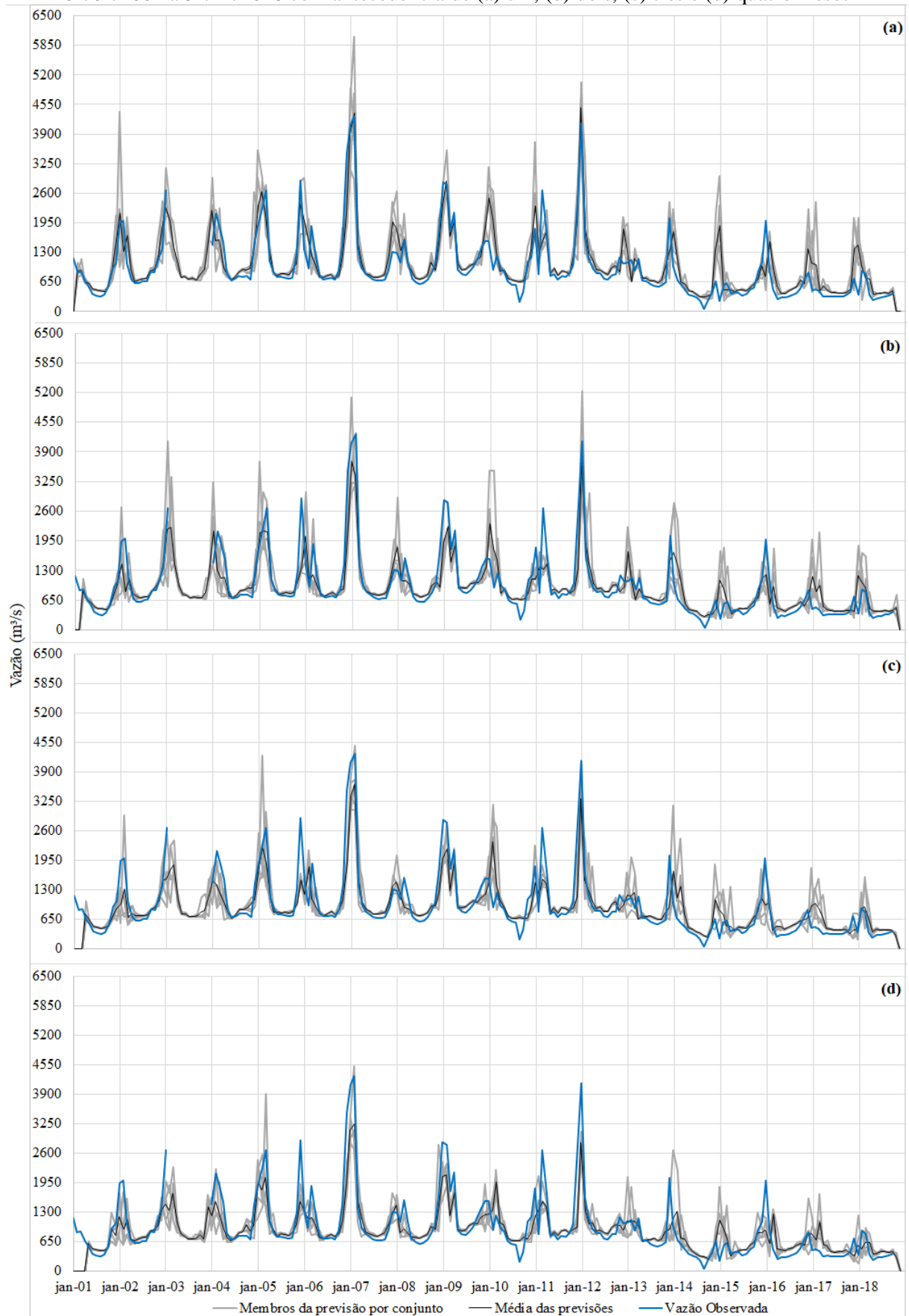


Figura B.9 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Porto dos Poções no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

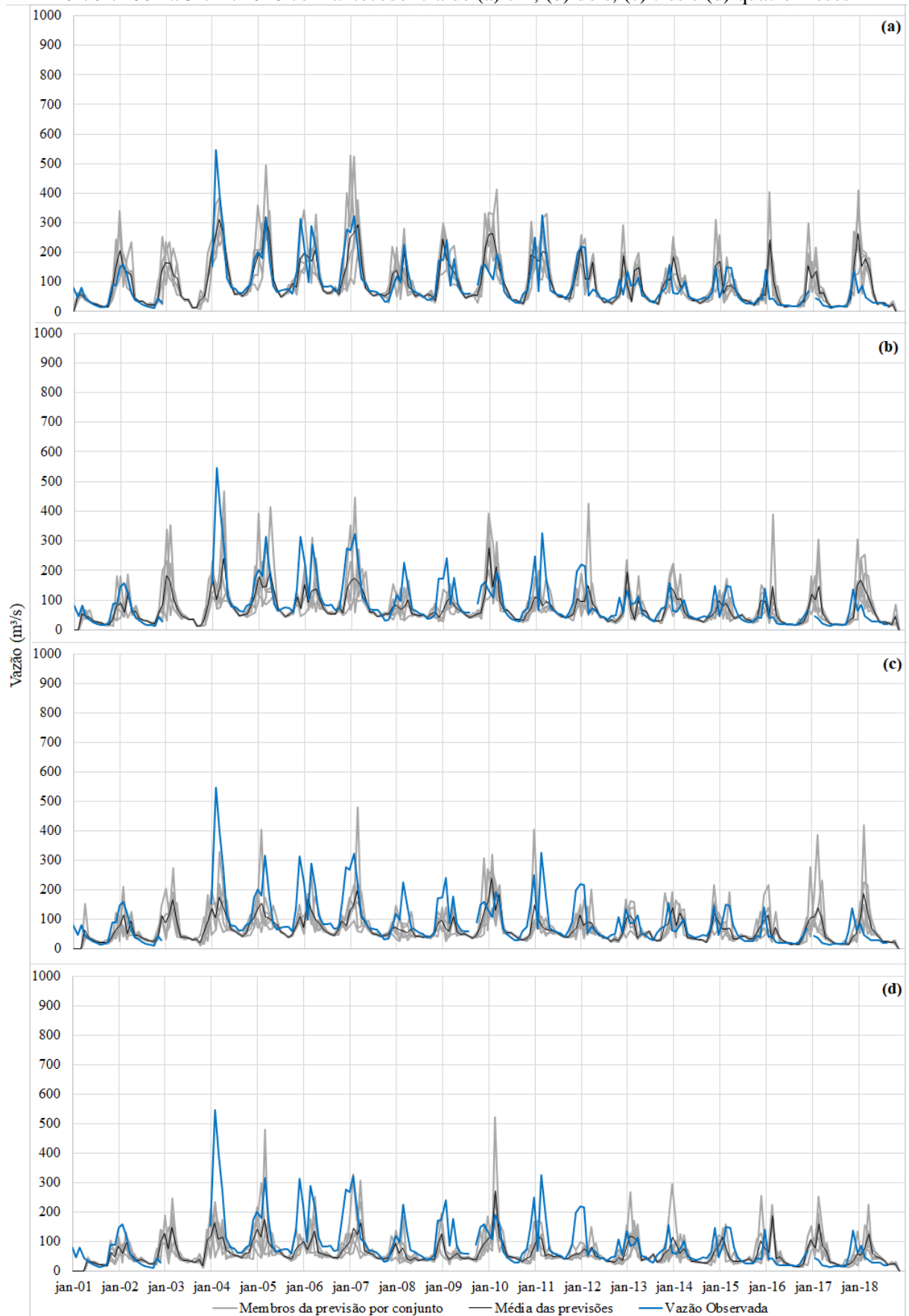


Figura B.10 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Porto da Extrema no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

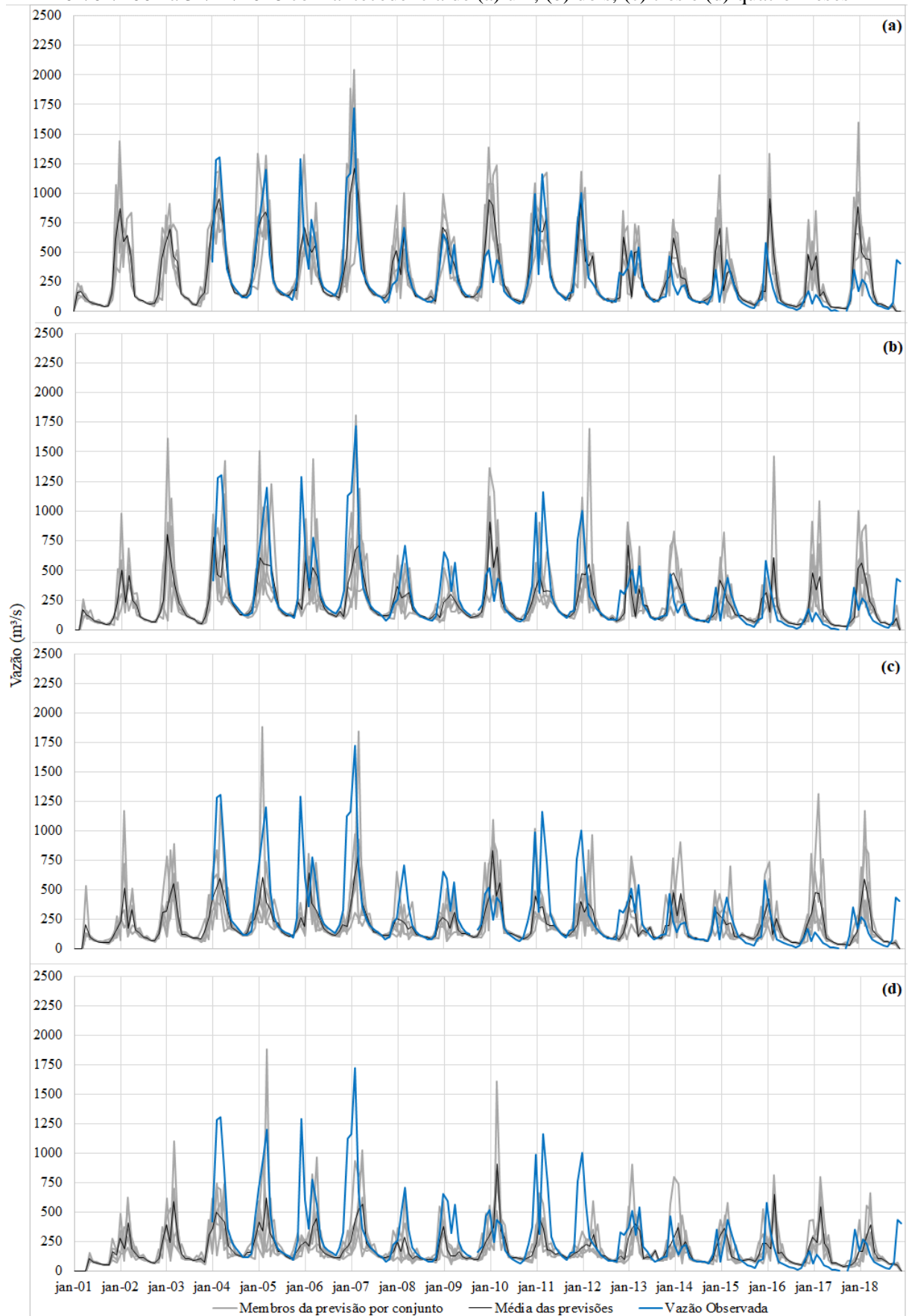


Figura B.11 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Porto Alegre no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

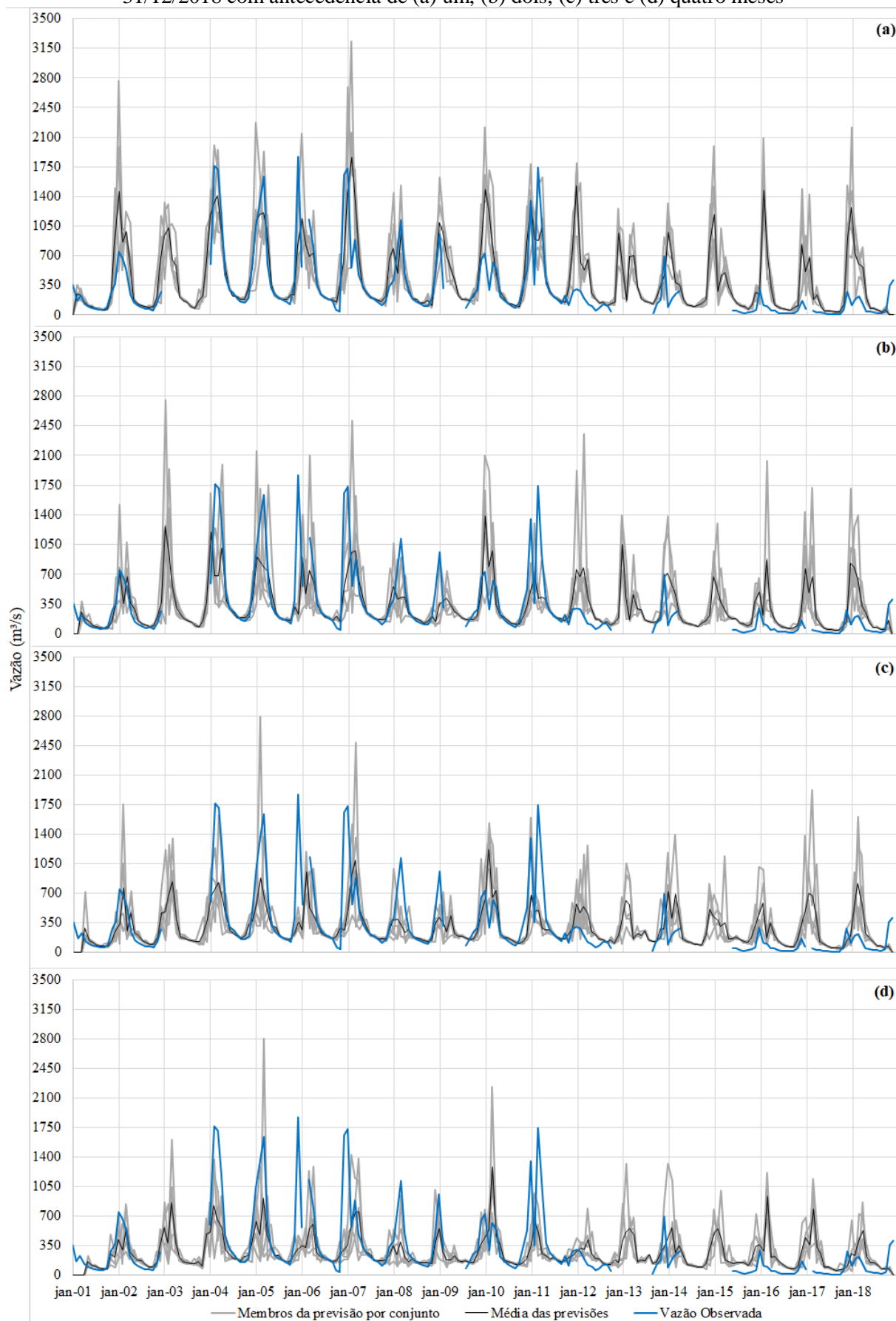


Figura B.12 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Santo Inácio no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

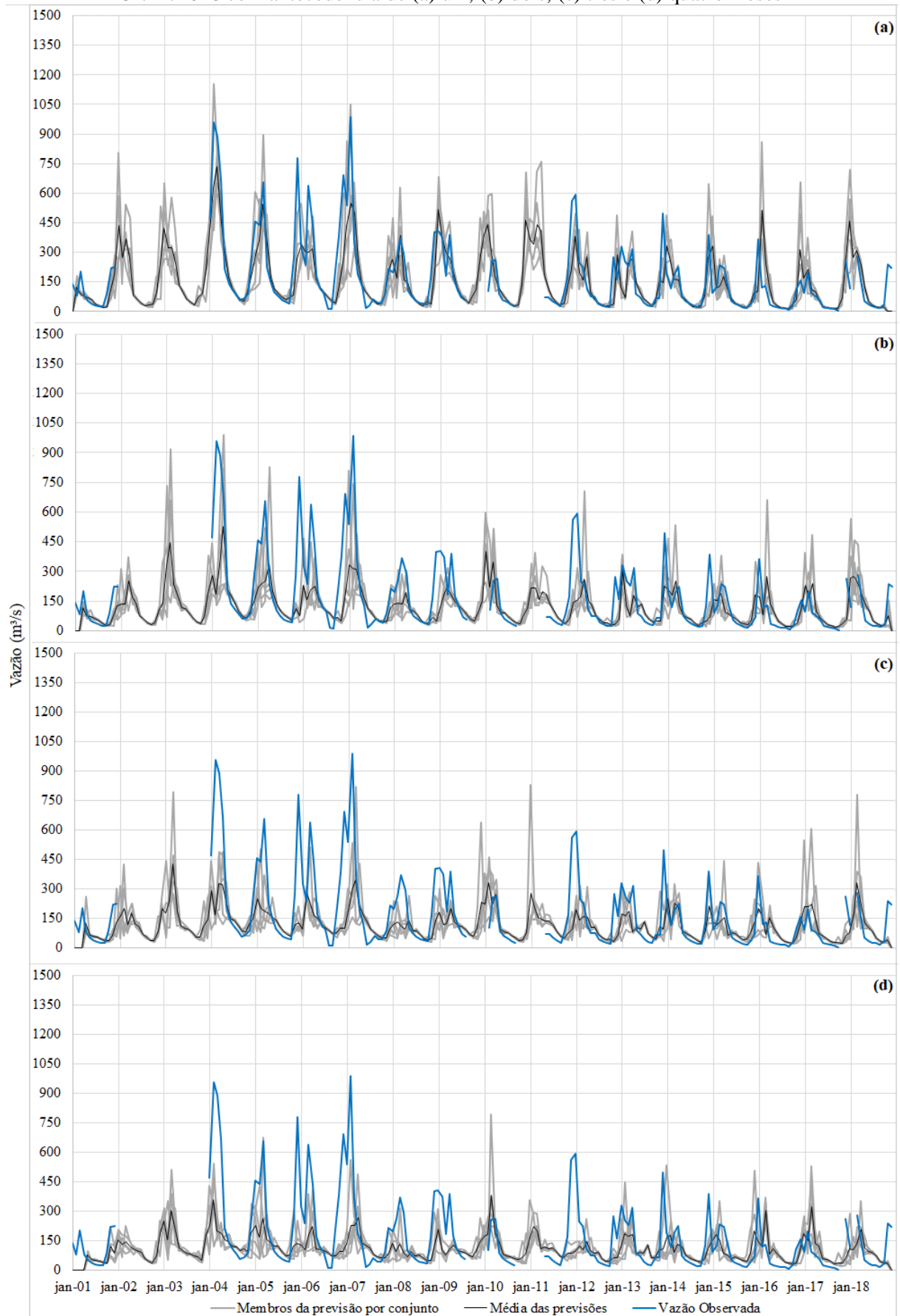


Figura B.13 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para São Francisco no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

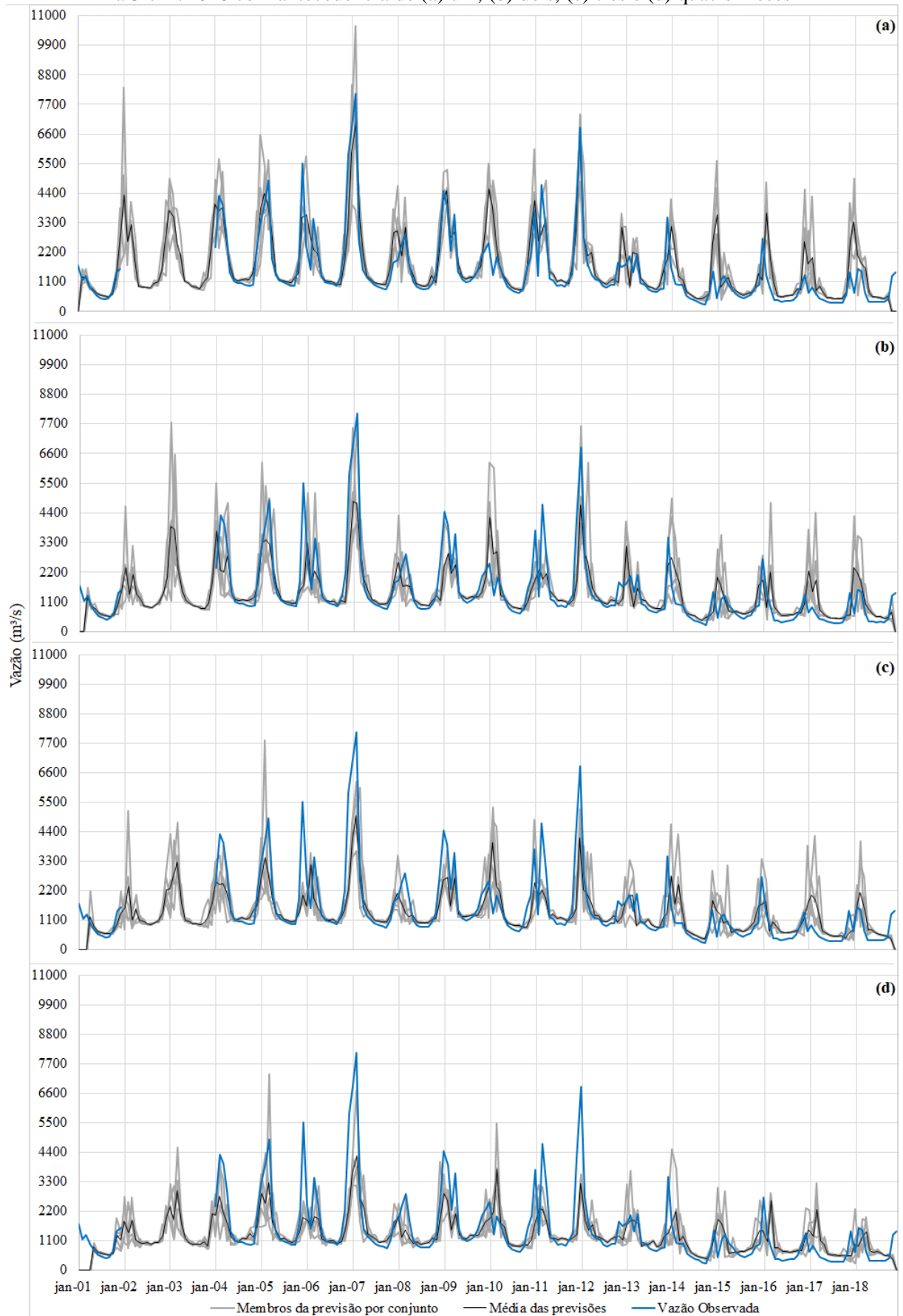


Figura B.14 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Boca da Caatinga no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

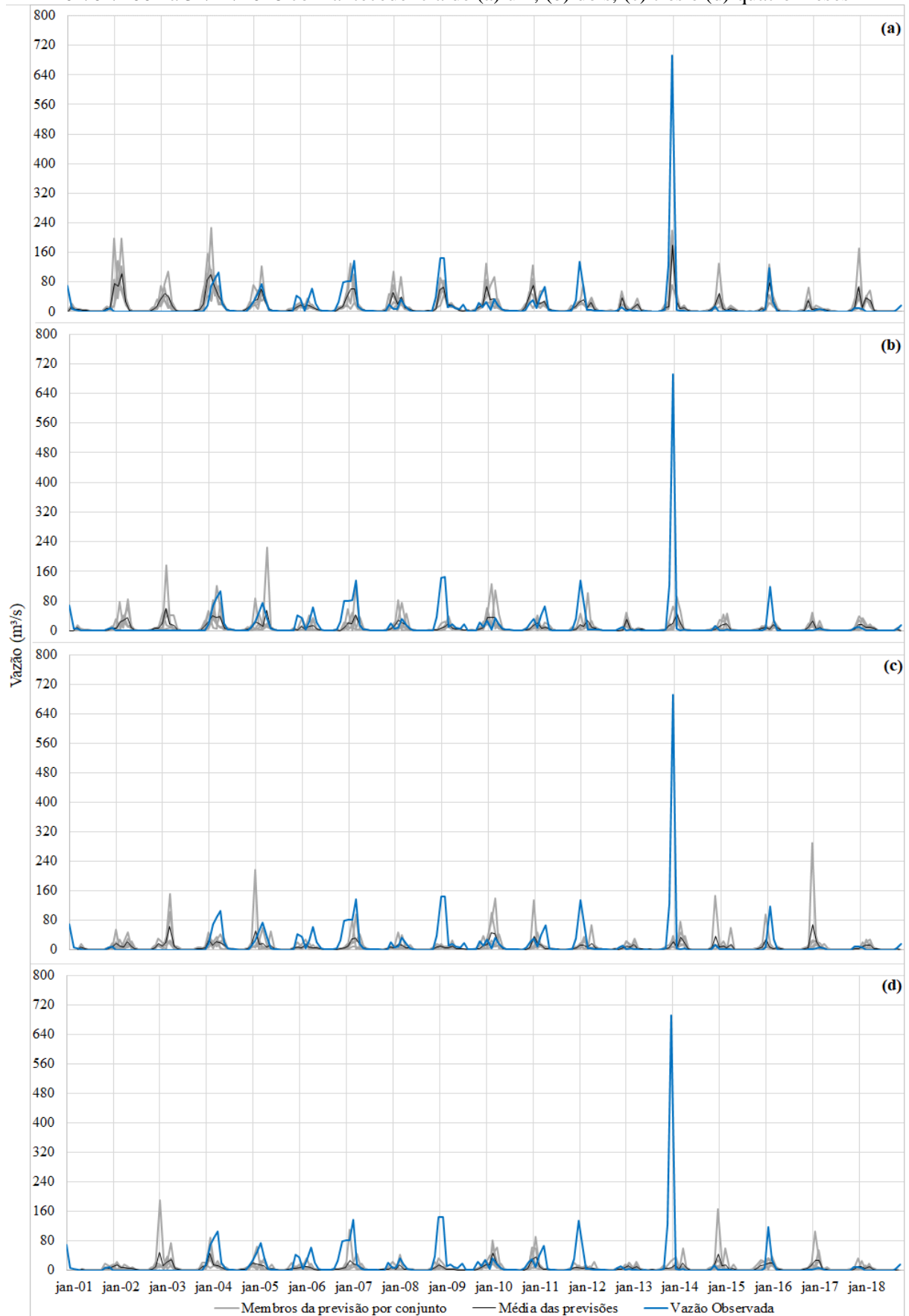


Figura B.15 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Juvenília no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

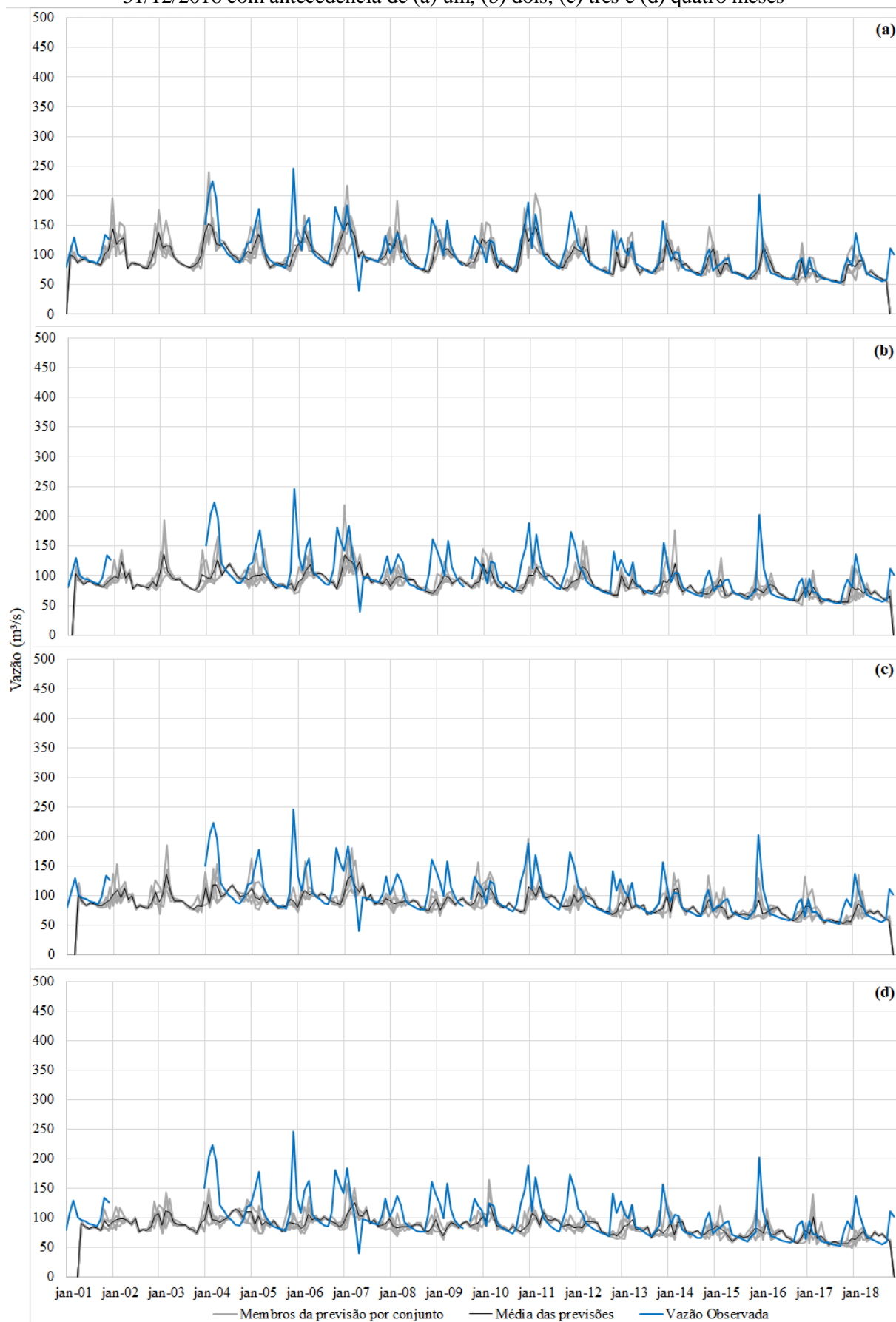


Figura B.16 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Bom Jesus da Lapa no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

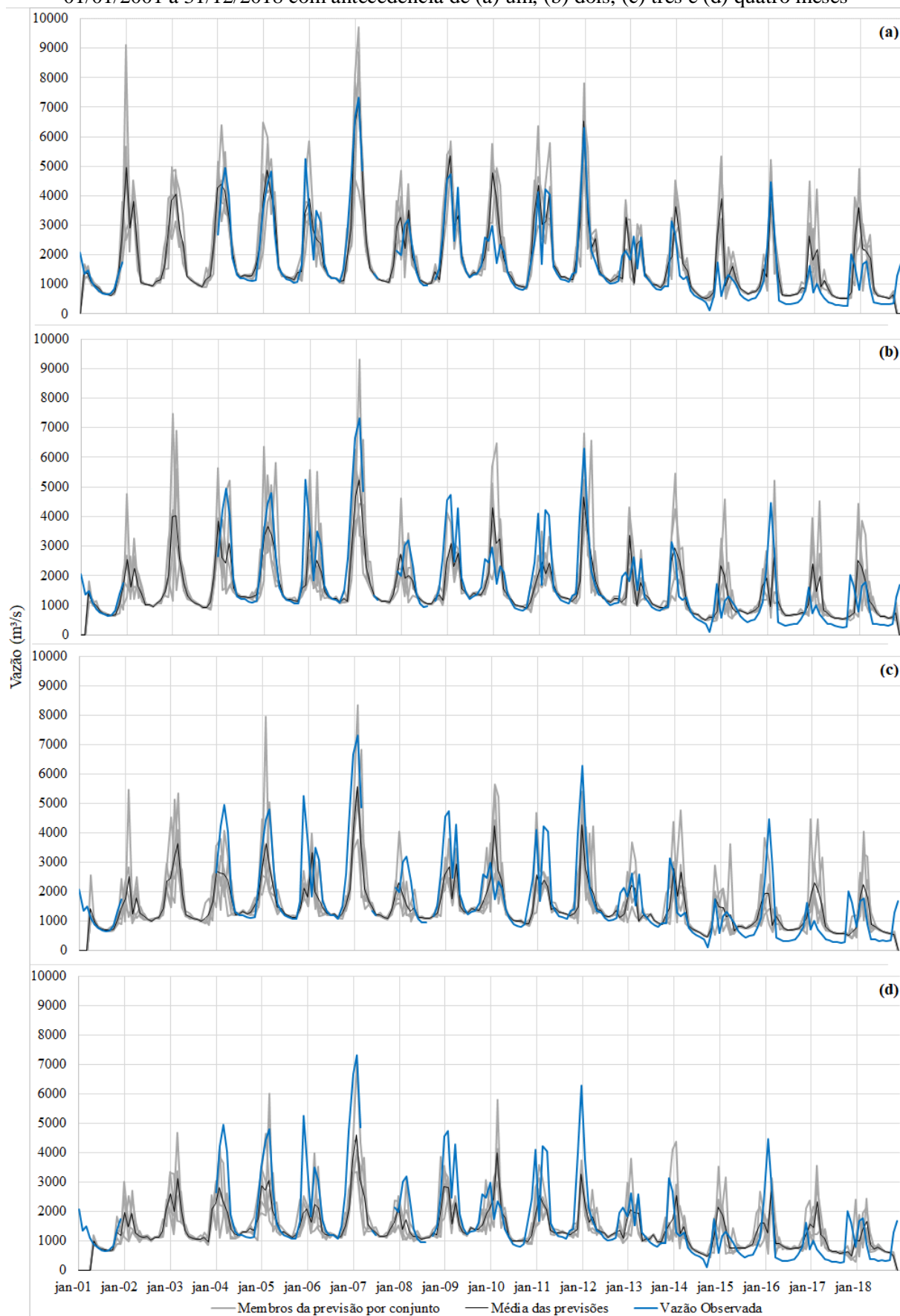


Figura B.17 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Porto Novo no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

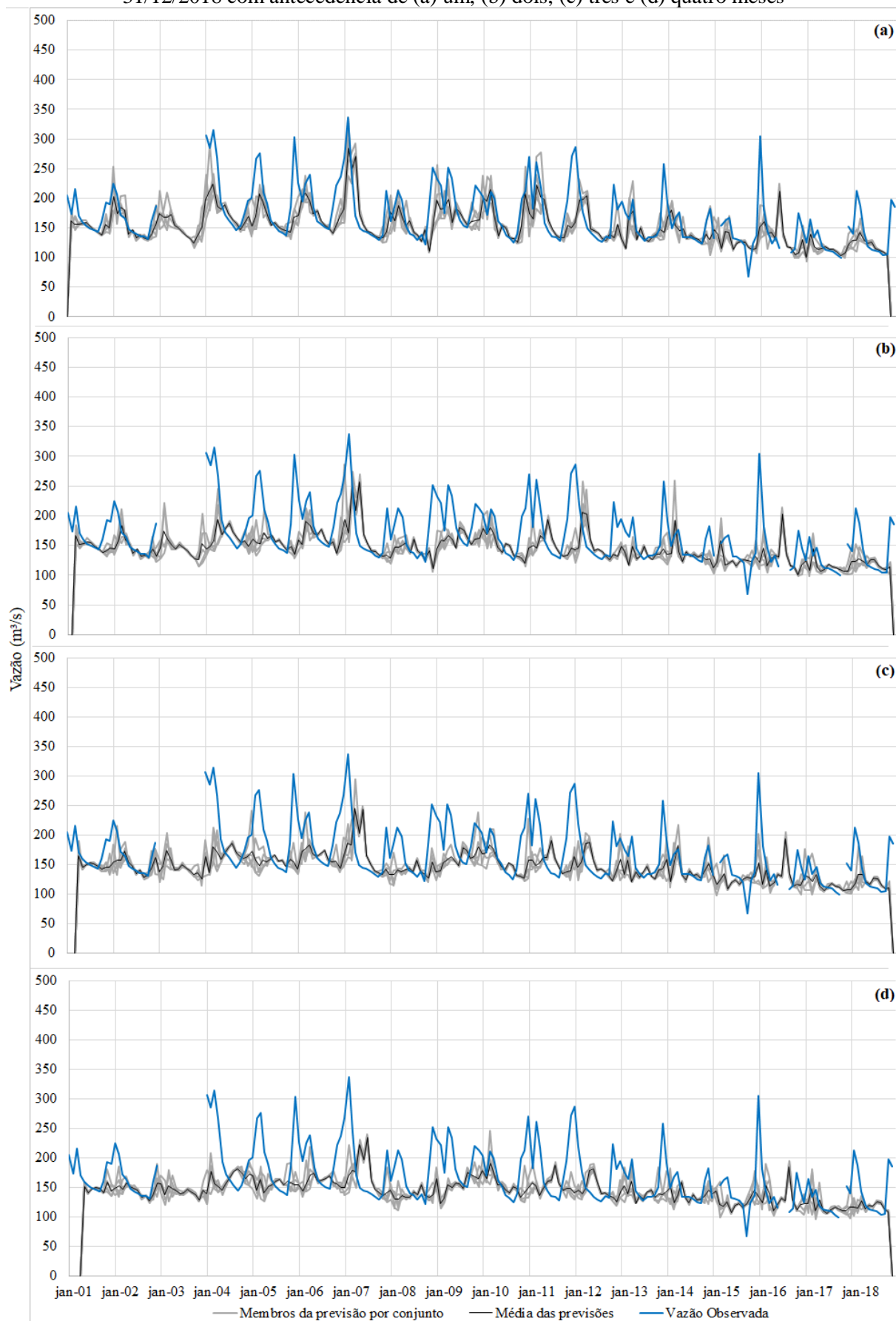


Figura B.18 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Morpará no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

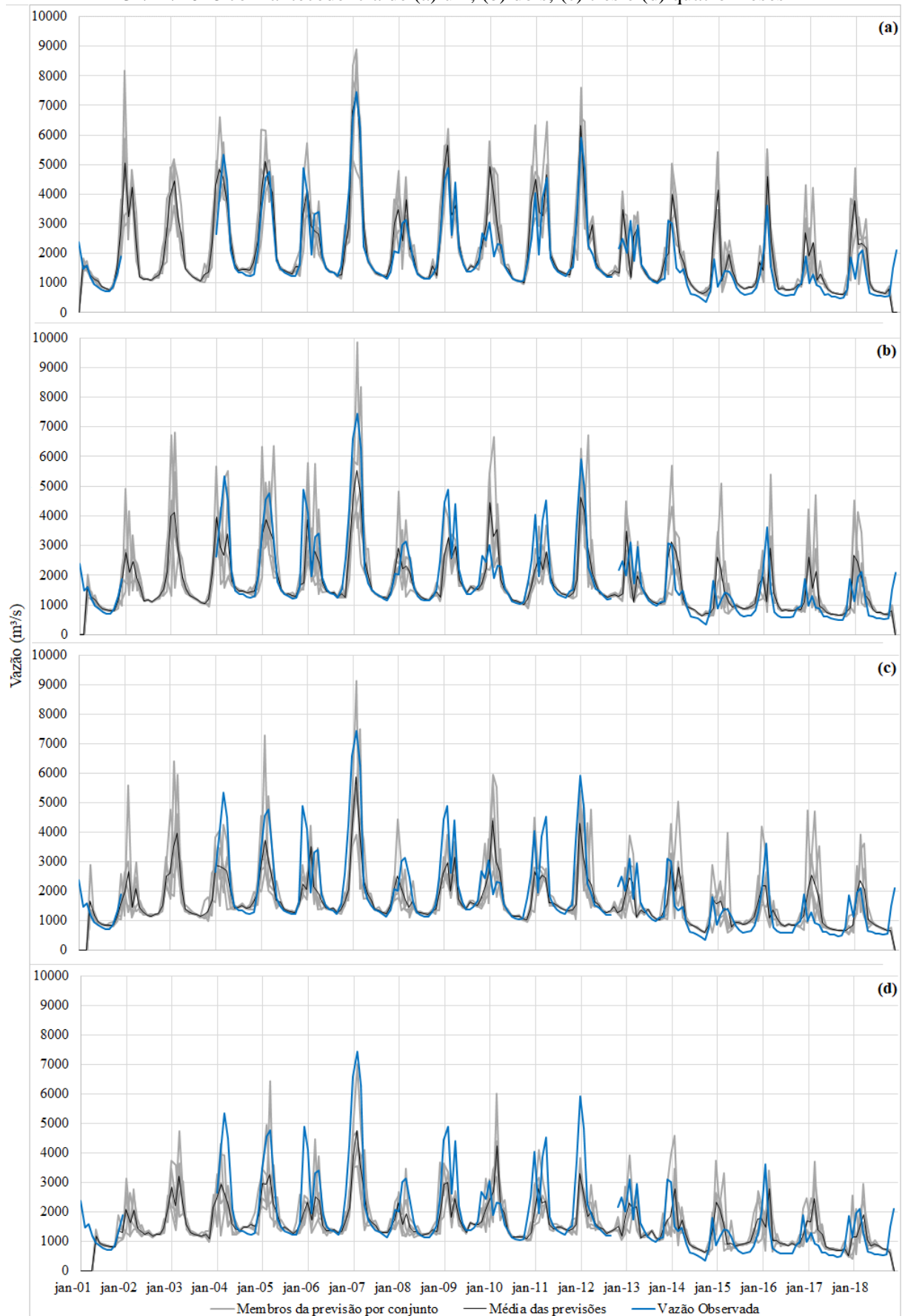


Figura B.19 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Fazenda Macambira no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

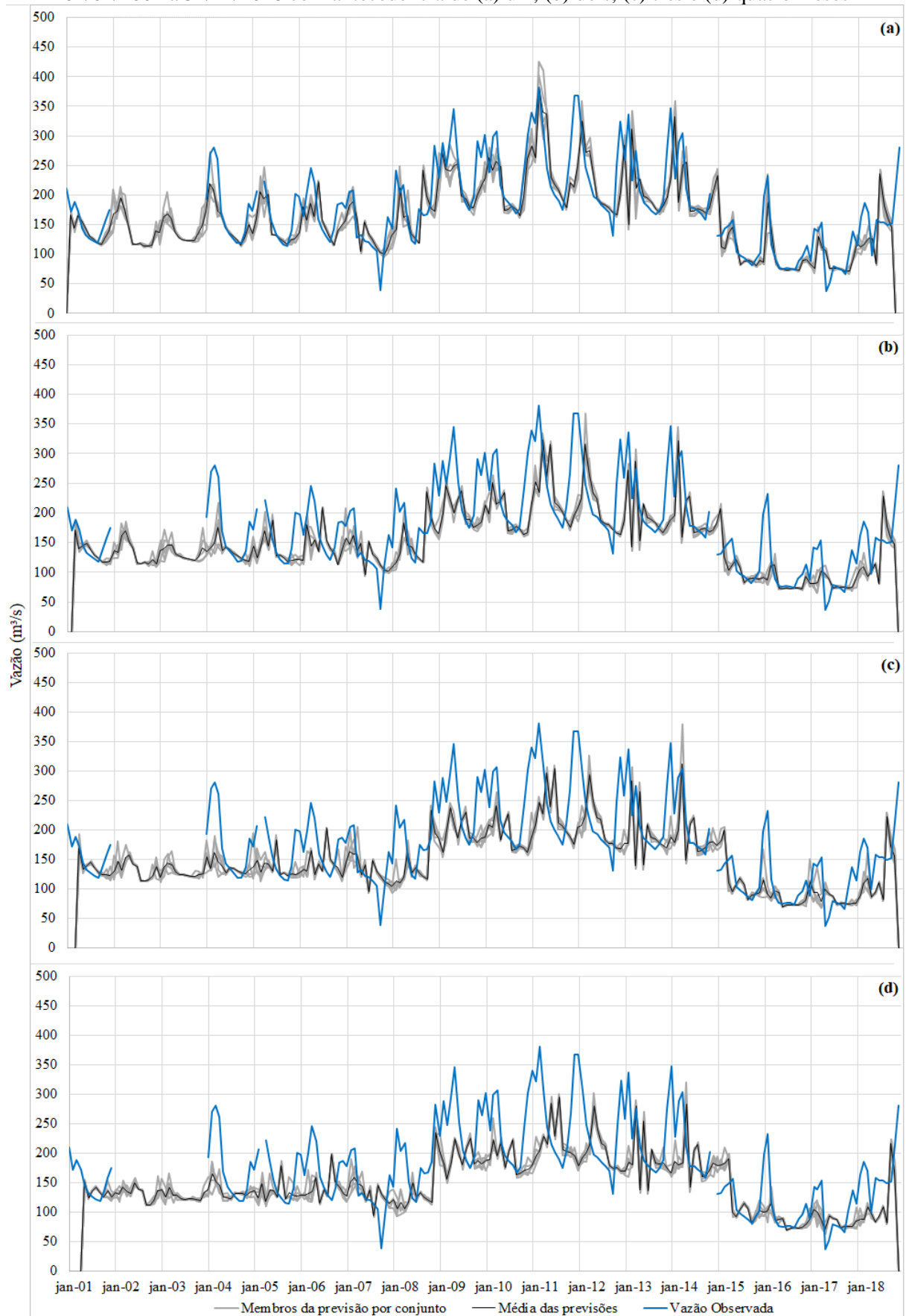


Figura B.20 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Boqueirão no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

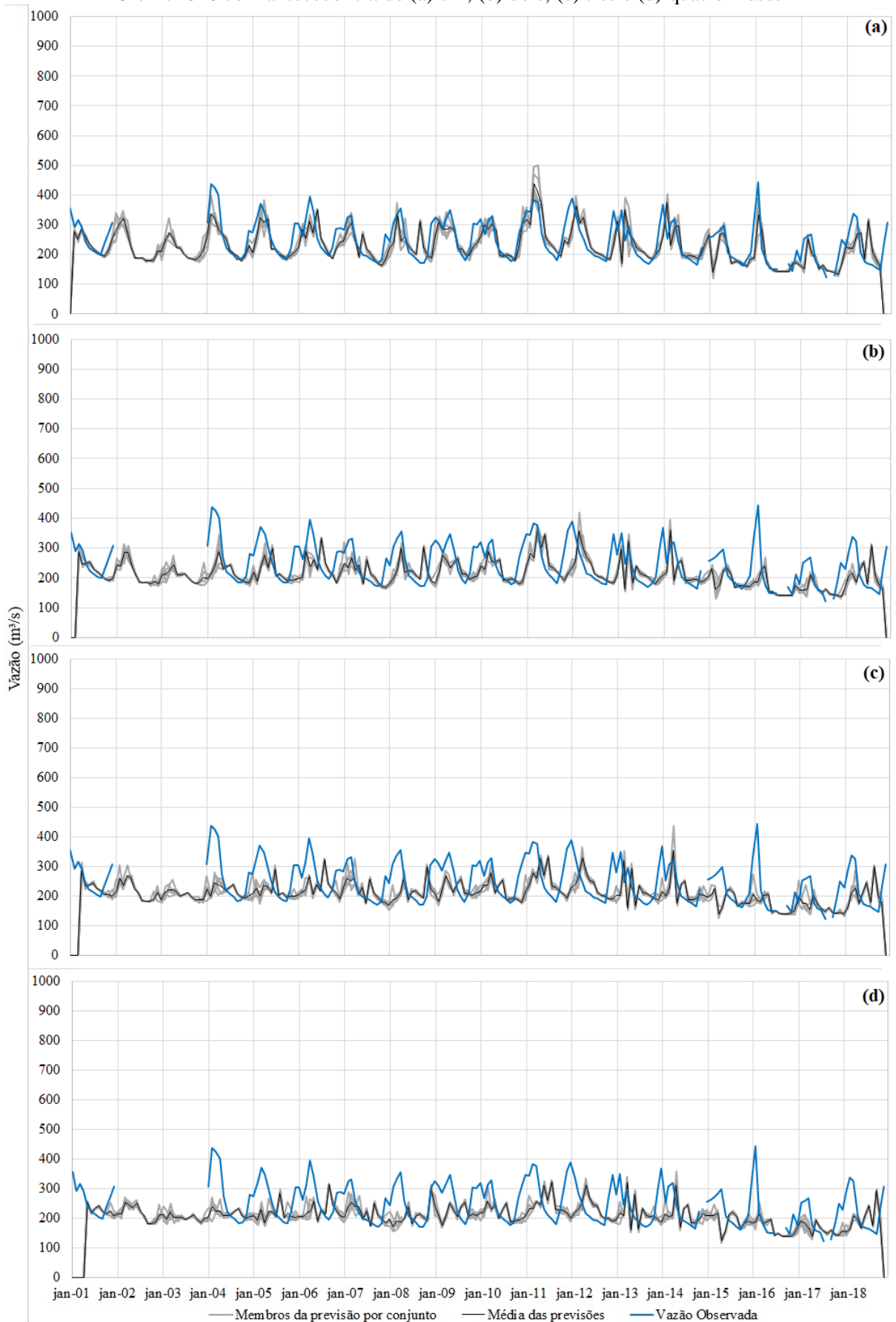


Figura B.21 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Sobradinho no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

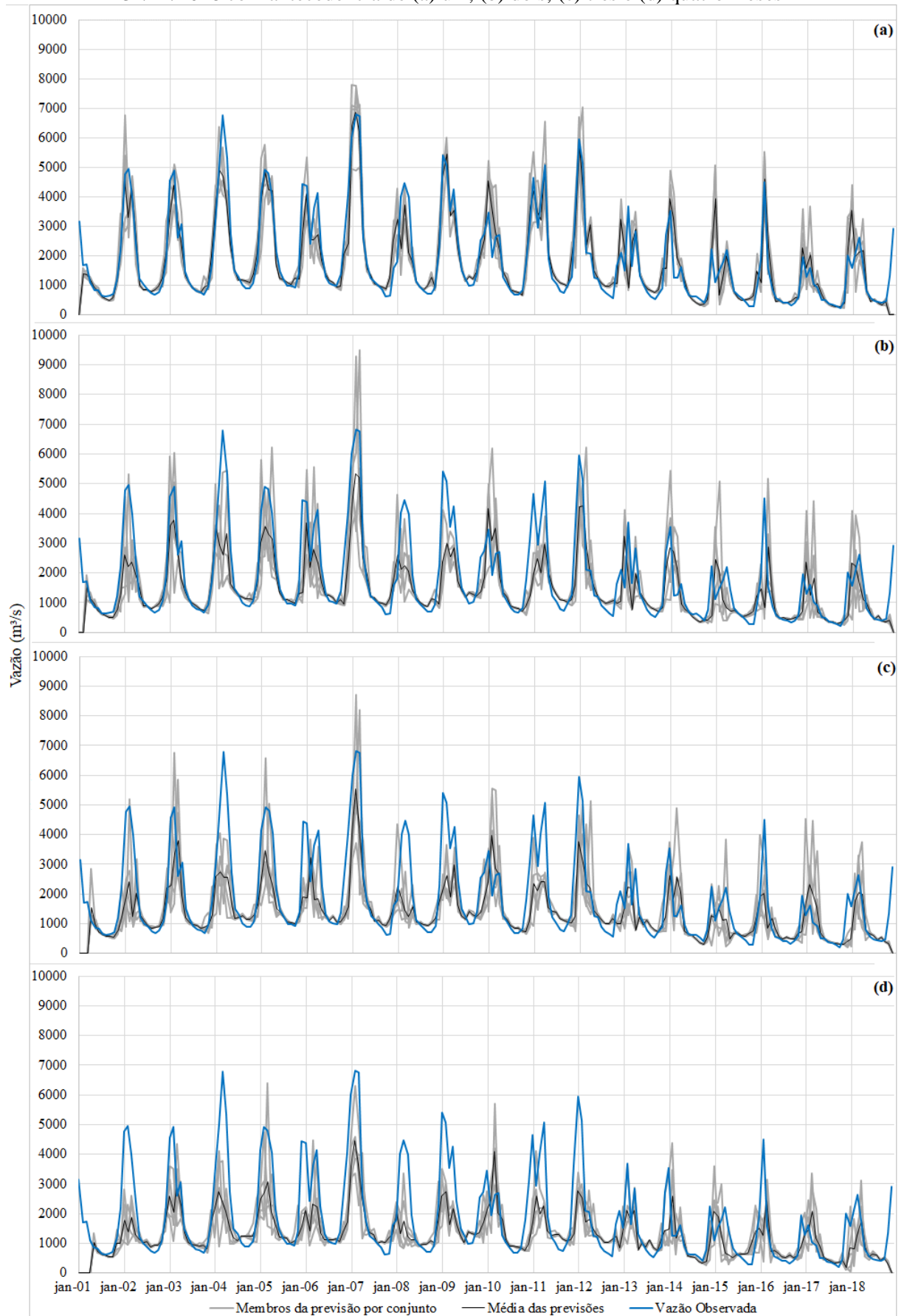


Figura B.22 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Ibó no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

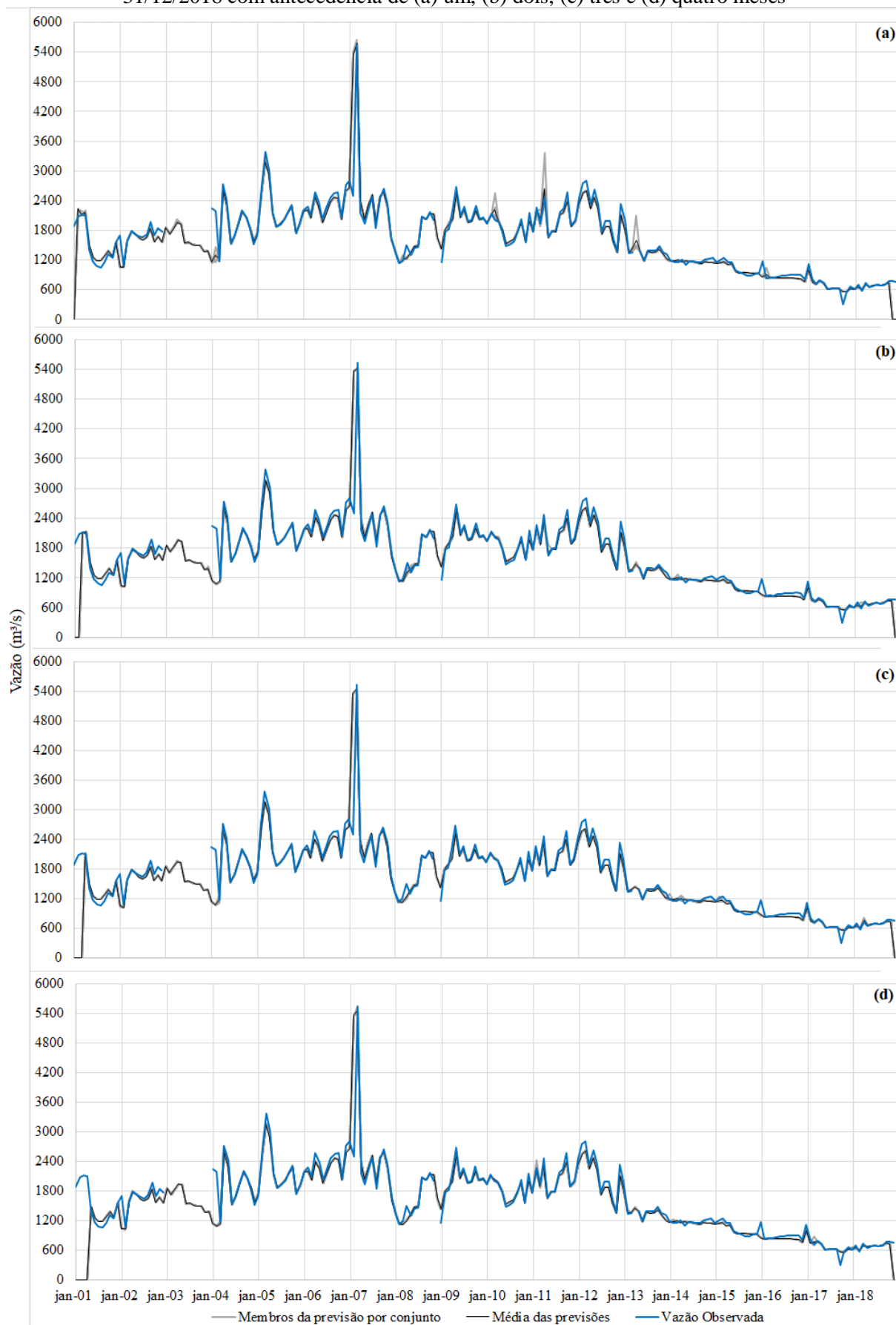


Figura B.23 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Floresta no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

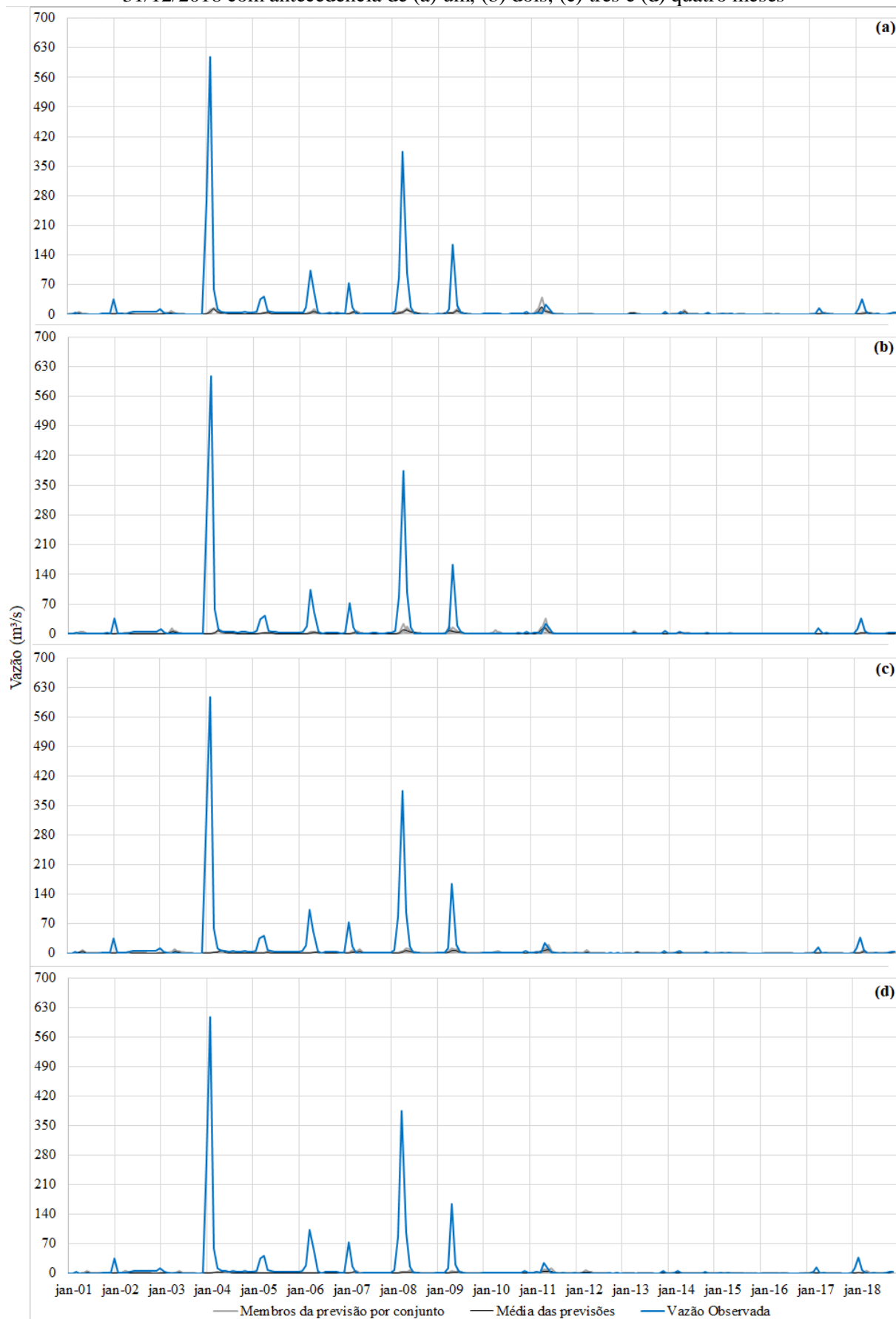


Figura B.24 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Itaparica no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

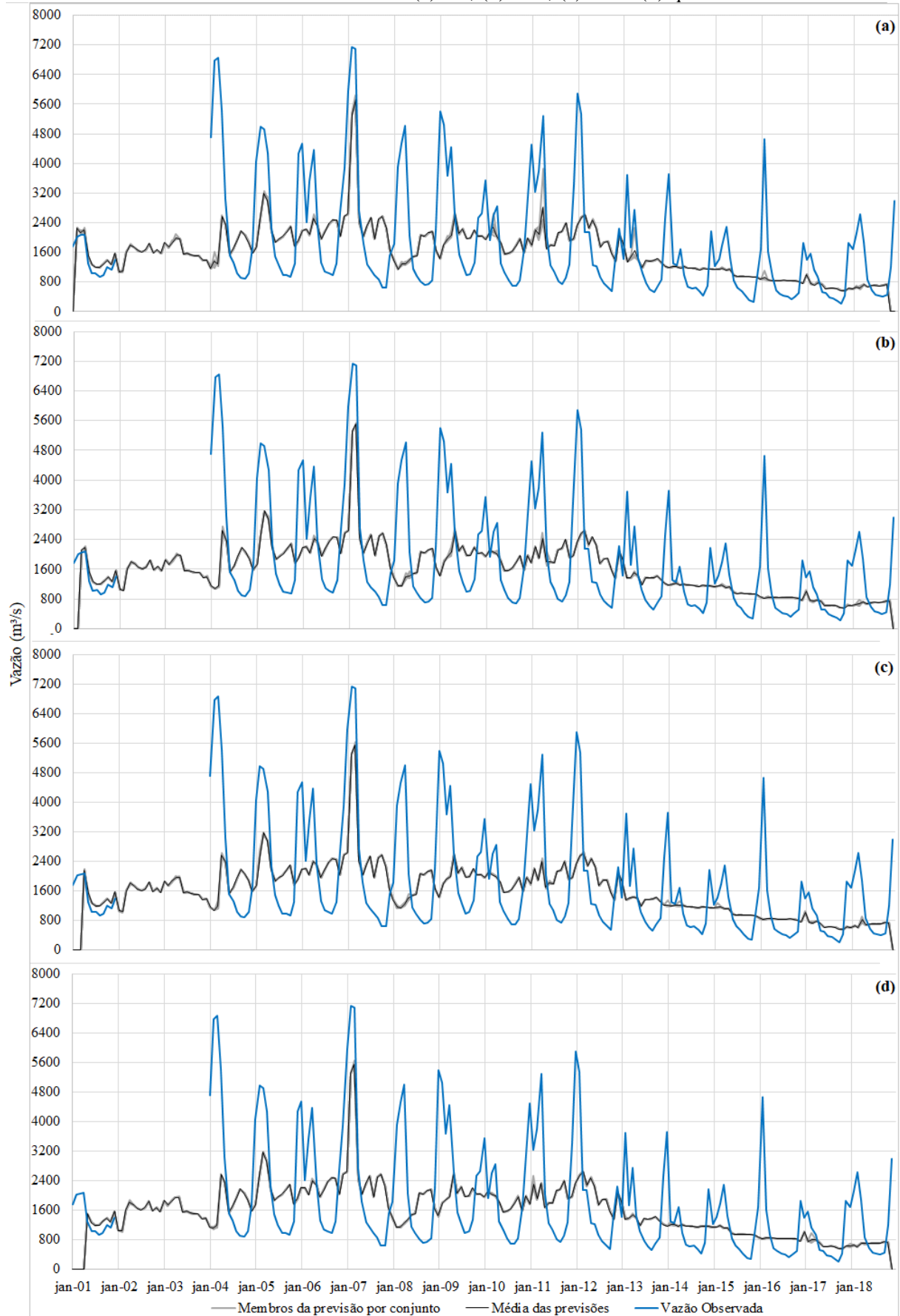


Figura B.25 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Moxotó e Paulo Afonso no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

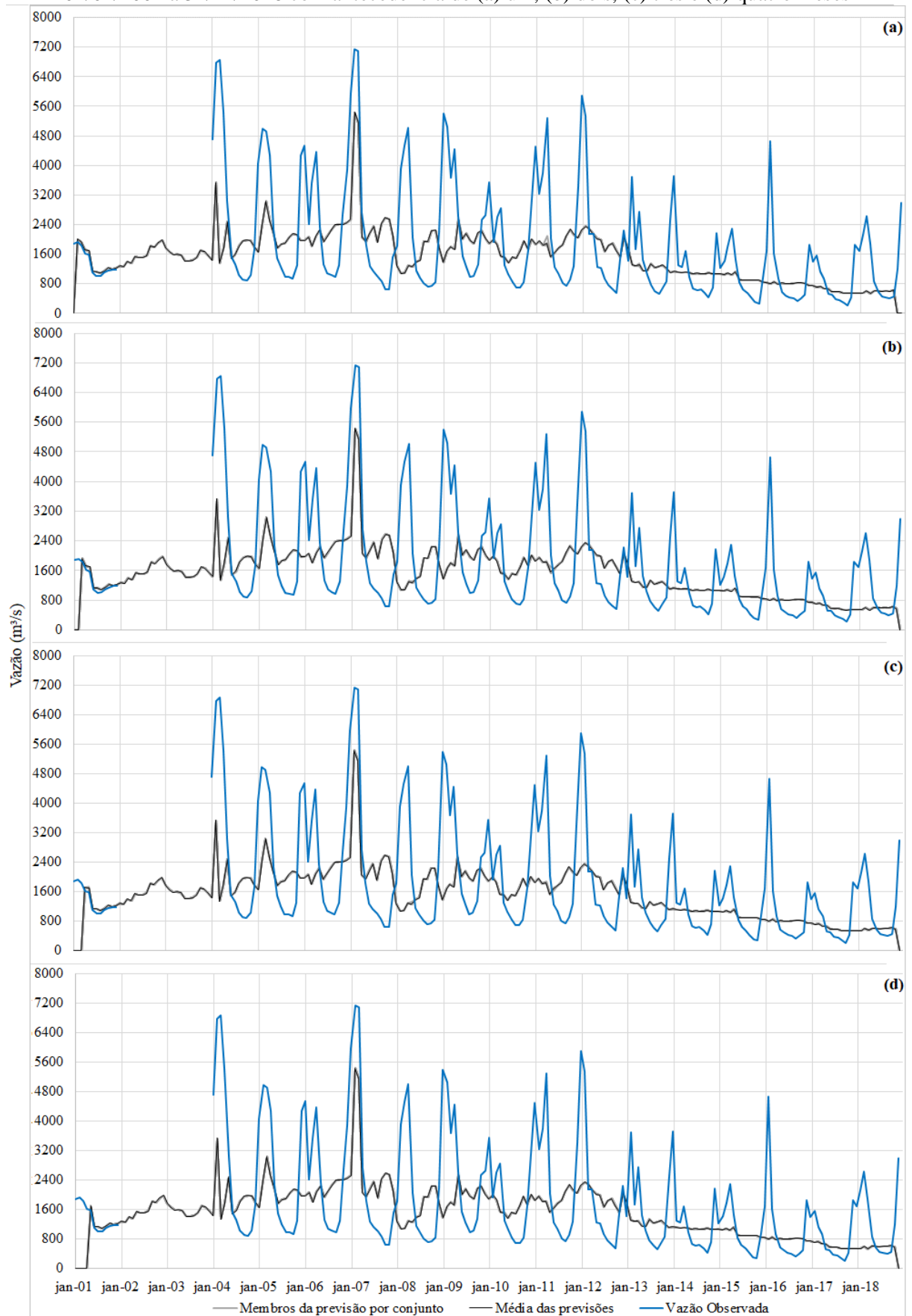


Figura B.26 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Pão de Açúcar no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

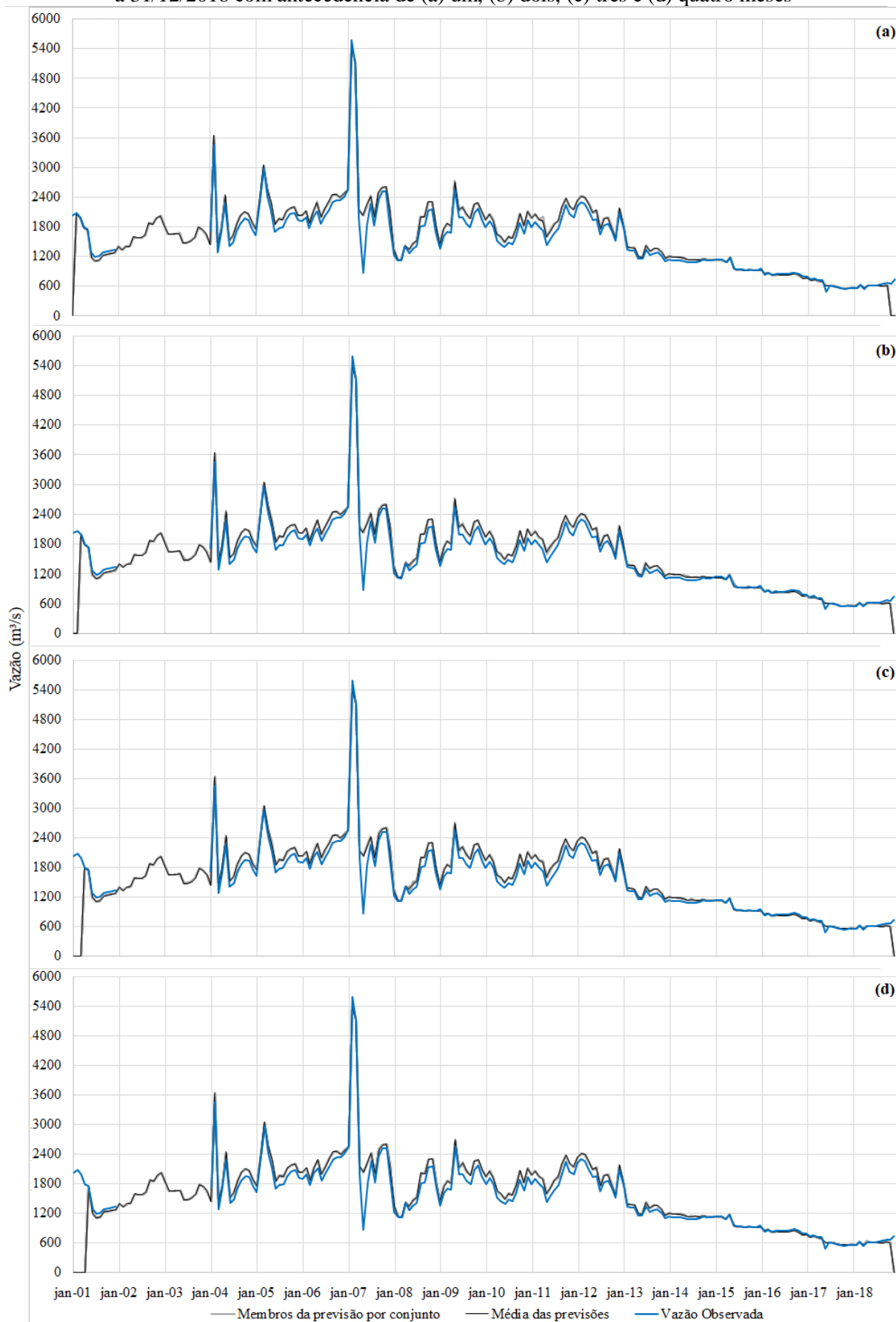


Figura B.27 – Previsões de vazão mensal (por conjunto) para Foz no período de 01/01/2001 a 31/12/2018 com antecedência de (a) um, (b) dois, (c) três e (d) quatro meses

